Agricultura de Precisão: Um Novo Olhar na Era Digital

editores Luís Henrique Bassoi | Alberto Carlos de Campos Bernardi | Carlos Manoel Pedro Vaz
João Leonardo Fernandes Pires | Luciano Gebler | Lúcio André de Castro Jorge | Ricardo Yassushi Inamasu

Agricultura de Precisão: Um Novo Olhar na Era Digital

editores **Luís Henrique Bassoi | Alberto Carlos de Campos Bernardi | Carlos Manoel Pedro Vaz**
João Leonardo Fernandes Pires | Luciano Gebler | Lúcio André de Castro Jorge | Ricardo Yassushi Inamasu

São Carlos, SP
2024

Publicação em Parceria com a

redeILPF

EDITORA CUBO R. Conde do Pinhal, 1762 - Centro
São Carlos - SP, 13560-648
Telefone: (16) 3509-7800
www.editoracubo.com.br

As opiniões, conceitos, afirmações e conteúdo desta publicação são de exclusiva e de inteira responsabilidade dos autores.

Todos os direitos reservados.
A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Agricultura de precisão [livro eletrônico] : um novo olhar na era digital / editores Luís Henrique Bassoi...[et al.]. -- São Carlos, SP : Cubo Multimídia, 2024.
PDF

Vários autores.
Outros editores: Alberto Carlos de Campos Bernardi, Carlos Manoel Pedro Vaz, João Leonardo Fernandes Pires, Luciano Gebler, Lúcio André de Castro Jorge, Ricardo Yassushi Inamasu.
Bibliografia.
ISBN 978-65-86819-38-0

1. Agricultura 2. Agricultura de precisão 3. Agropecuária 4. Automação 5. Dados - Análise 6. Engenharia agrícola 7. Inovações tecnológicas I. Bassoi, Luís Henrique. II. Bernardi, Alberto Carlos de Campos. III. Vaz, Carlos Manoel Pedro. IV. Pires, João Leonardo Fernandes. V. Gebler, Luciano. VI. Jorge, Lúcio André de Castro. VII. Inamasu, Ricardo Yassushi.

24-239267 CDD-631.3

Índices para catálogo sistemático:

1. Agricultura de precisão 631.3

Eliete Marques da Silva - Bibliotecária - CRB-8/9380

Para versão eletrônica, acesse:
https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000001

Este livro foi produzido por
editora cubo
soluções para o universo acadêmico

© 2024 Os Editores. Todos os direitos reservados.

Este é um livro publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

Editores

LUÍS HENRIQUE BASSOI
Embrapa Instrumentação

ALBERTO CARLOS DE CAMPOS BERNARDI
Embrapa Pecuária Sudeste

CARLOS MANOEL PEDRO VAZ
Embrapa Instrumentação

JOÃO LEONARDO FERNANDES PIRES
Embrapa Trigo

LUCIANO GEBLER
Embrapa Uva e Vinho

LÚCIO ANDRÉ DE CASTRO JORGE
Embrapa Instrumentação

RICARDO YASSUSHI INAMASU
Embrapa Instrumentação

Autores

Abias Santos Silva 716, 724, 730
Adauto Luiz Mancini 442
Adriana da Hora Santos 657
Adriane Brill Thum 260
Aida Bebeachibuli Magalhães 222, 229
Alberto Carlos de Campos Bernardi 75, 88, 623, 665, 702, 751, 758, 762, 773, 789
Alda Juliana Castro de Sousa 689
Aldemir Pasinato 421
Alessandro da Silva Oliveira 338
Alexandre Alan Cassinelli 248, 394, 579
Alexandre Cláudio Botazzo Delbem 44
Alexandre Rossetto Garcia 623, 689, 758
Alex Bisetto Bertolla 44
Alfredo Augusto Pereira Xavier 222, 229
Alfredo José Barreto Luiz 782
Aline Linhares do Amaral 355
Alvadi Antônio Balbinot Junior 159, 360, 403
Álvaro Vilela de Resende 40, 331, 428
Amanda Heemann Junges 586
Amanda Vieira Ribeiro 222, 229
Amandio Pires Junior 314
Ana Paula Marques Ramos 52
Anderson de Jesus Pereira 532, 543
Ânderson Fischoeder Soares 682
Anderson Sartori 159
Andrea De Rossi 488, 493, 509
Andréa do Nascimento Barreto 689
André Luis Vian 40, 248, 255, 388, 394, 428, 579
André Luiz Monteiro Novo 736
Andres Eduardo Baquero Velasquez 97
André Torre-Neto 280
Anelise Brun 394
Angelica Bender 543
Anna Elisa Petersen Gatelli 255
Antônio Luis Santi 178, 307, 324, 355, 579
Ariovaldo Luchiari Júnior 442, 449
Bernardo Limberger Pertile 307
Breno Silva Beda de Assunção 75, 88
Bruno Carvalho 677

Bruno José Olivieri de Souza 209
Bruno Ricardo Silva Costa 532, 543
Bruno Siqueira da Silva 209
Bruno Tadashi Chiba da Silva 255
Carlos Alberto Flores 604, 612
Carlos César Ronquim 442, 449
Carlos Eduardo Buratto 421
Carlos Goergen 421
Carlos Gustavo de Camargo Ferraz Machado 657, 665
Carlos Ivan Mozambani 455
Carlos Manoel Pedro Vaz 40, 52, 88, 314, 346, 360, 368, 376, 428
Carlos Moyses Abrahão Auzi Ribeiro 476
Carolina Previati 307
Carolina Trentin 40, 394, 428
Caroline Montanari Giraldi 178, 307, 324, 353
Cassio Antônio Andrade 44
Célia Regina Grego 518, 569
Celito Crivellaro Guerra 554
César Luis Girardi 604
Christian Bredemeier 40, 248
Claudia Cardoso Nunes 471
Claudia Rita de Souza 543
Claudio Antônio Versiani Paiva 716
Claudio Leones Bazzi 107
Cristiam Bosi 751
Cristina Aparecida Gonçalves Rodrigues 442
Daniela Dal Bosco 482
Daniel Alexandre Botta de Siqueira 376
Daniel Varela Magalhães 97
Daniely Vaz da Silva-Sangoi 239
Darlan Alaor Selzlein 476
David José Miquelutti 272
David Peres da Rosa 412
Débora Marcondes Bastos Pereira Milori 9, 222, 229, 234
Débora Pignatari Drucker 442
Deniver Reinke Schutz 115
Diego Lima Lucchesi 248
Diego Rodrigo Longo 464
Diego Silva Fortuna 272
Diniz Carvalho de Arruda 260
Diogo Néia Eberhardt 797
Diones Thiesen Hüther 307
Djone Fucks 421

Edemar Joaquim Corazza 166, 297
Edilene Cristina Ferreira 44
Edilson da Silva Guimarães 665, 762, 773
Edison Ulisses Ramos Junior 38, 403, 428
Ednaldo José Ferreira 44, 280, 376
Eduarda Brizolla 324
Eduardo Antonio Speranza ..vii, 52, 314, 346, 360, 368, 376, 442, 449, 509, 518, 526, 569
Elenilson Godoy Alves Filho 482
Elisa Maria Befert 388
Elmer Alexis Gamboa Peñaloza 115
Eric Scopel 797
Esmael Lopes dos Santos 159
Evandro Chartuni Mantovani 75, 88
Everaldo Paulo Medeiros 290
Ezequiel Zibetti Fornari 178, 307, 324, 355
Fabiana Cunha Viana Leonelli 657
Fabio Martins Guerra Nunes Dias 647
Felipe Tonato 665
Fernanda Figueiredo Granja Dorileo Leite vii
Fernanda Samarini Machado 716, 724, 730
Fernando José Hawerroth 255
Filipe Belchor Barcelos 178
Flávio Bello Fialho 554
Flavio Santos da Silva 376
Franciane Lemes dos Santos 394
Franciele Morlin Carneiro 290
Francisco Mickael de Medeiros Câmara 521
Frederico Victor Dos Santos Silva 140
Gabriela Naibo 248
Gabriela Novais Azevedo 689
Gabriel Augusto Engel 248
Gabriel Marson 255
Gabriel Rieder Marson 579
Gean Nascimento Rocha 172
George Wellington Bastos de Melo 554
Gilmar Arduino Bettio Marodin 255, 579
Giovana Maranhão Bettiol 758
Giovanna Galhardo Ramos 689
Giseli Rodrigues Crizel 604
Giuliano Elias Pereira 554
Glaucio José Gomes 107, 140
Guilherme Amorim Ventriche Favero da Silva 222
Guilherme Jordão de Magalhães Rosa 647

Gustavo Costa Rodrigues 442
Heitor Vinicius Mercaldi 115
Hélio de Sena G. Omote 665
Henrique Bauab Brunetti 751, 758
Henrique Debiasi 159, 314, 360, 403
Henrique Oldoni 532, 543
Henrique Pauletto 586, 596
Henrique Pessoa dos Santos 554
Hildo Meirelles de Souza Filho 455
Hugo Machado Rodrigues 290
Isabela Pedrino Maiello 758
Isabela Seffrin Rodrigues 388
Ivan Bergier vii
Ivani de Oliveira Negrão Lopes 314, 346, 360, 368
Jaciara Diavão 716, 724, 730
Jardel Talamini de Abreu 509
Jayme Garcia Arnal Barbedo 636
Jean-Jacques Georges Soares de Groote 338
Jean Louis Belot 376
Jean Michel Moura-Bueno 239
Jéferson Diego Leidemer 193
Jeferson Giehl 331
João Leonardo Fernandes Pires 38, 394, 421, 428
João Pedro Cunha Arruda 355
João Ricardo Rebouças Dórea 716, 724, 730
Jonas Gomes 677
Jordano Bortoncello 421
Jorge Ricardo Ducati 260
José Alexandre Melo Demattê 172
José Francirlei de Oliveira 166
José Marcato Júnior 52
José Maria Filippini-Alba 185, 193, 200, 604, 612
José Maria N. David 677
José Otávio de Almeida Bueno 773
Jose Paulo Molin vi
José Ricardo Macedo Pezzopane 623, 751, 758, 762, 773, 789
Josiane Rodrigues 762
Josieli Aparecida Fortuna 272
Juaci Vitória Malaquias 297
Júlia Faccin Faé 579
Juliana Erika de Carvalho Teixeira Yassitepe 88
Juliane Barreto de Oliveira 554
Julio Cezar Franchini dos Santos 38, 159, 314, 346, 360, 368, 376, 403, 428

Júlio Tagliari Balestrin 412
Kelyn Schenatto 107, 140
Ketlin Paôla Breunig 736
Kleydson Stênio Gaioso da Silva 222, 229
Ladislau Marcelino Rabello 314, 346, 368
Ladislau Martin Neto 222, 229
Larissa Godarelli Farinassi 532, 543
Larissa Lamperti Tonello 324
Laurimar Gonçalves Vendrúsculo 403
Leandro Bortoluz 255
Leonardo Bidese de Pinho 682
Leonardo Bonacini 97
Leonardo Gravina Fonseca 677
Leoni Leite 657
Leo Rufato 482
Leticia dos Santos 107
Lívia Ferreira Pinho 689
Luana Selli 789
Lucas Bueno do Amaral 543
Lucas da Ressurreição Garrido 260, 554
Lucas de Ross Marchioretto 147
Lucas Prado Osco 52, 338
Luciano Gebler 107, 140, 147, 249, 272, 464, 471, 476, 482, 488, 493, 509, 518, 526, 554, 569
Luciano Shozo Shiratsuchi 290, 297, 331
Luciano Vieira Koenigkan 442
Lucimara Rogéria Antoniolli 482
Lucio André de Castro Jorge 52, 209, 338, 368
Lúcio de Paula Amaral 471, 488
Luís Carlos Leva Borduchi 234
Luís Felipe Rossetto Gerlach 178, 307, 324, 355, 579
Luís Henrique Bassoi 532, 543
Luiz Fernando Pezzini Ribas 178
Luiz Gustavo Ribeiro Pereira 716, 724, 730
Luiz Henrique Baptista Velho 355
Luiz Henrique Witzler 657
Maicon Andreo Drum 388, 394
Manuele Zeni 394
Marc Corbeels 797
Marcela de Mello Brandão Vinholis 455, 657, 665
Marcelo Becker 97
Marcelo de Carli Toigo 394
Marcelo José Carrer 455
Marcio da Silva Santos 509

Márcio de Souza 314, 376
Marcos Botton 554
Marcos Caraffa 394
Marcos Cezar Visoli 44, 647
Marcos Corrêa Neves 782
Margareth Gonçalves Simões 75, 88
Maria Angelica de Andrade Leite 75, 88
Maria Cristina Neves de Oliveira 314
Maria de Fátima Guimarães 166
Maria Lucrecia Gerosa Ramos 88
Mariana Jucá Moraes 689
Mariana Magalhães Campos 12, 724, 730
Marina de Fátima Vilela 297
Mateus Foscarin Montanari 272
Mateus Valverde Gasparino 97
Matheus Santos Luccas 280
Maurício Conrado Meyer 234
Maurício Guilherme Stein Vian 355
Maurício Piccoli Bonatti 324
Mauro Celso Zanus 554
Mauro Henrique de Lima Filho 222, 229
Mélory Maria Fernandes de Araujo 200
Michel Brossard 166
Mirabor José Leite Júnior 147
Nacir Paranhos 665
Naylor Bastiani Perez 682, 782
Nicholas Matias 209
Nicolle Laurenti 758, 762
Osvaldo Guedes Filho 797
Pablo Miguel 193, 200
Pâmela Aude Pithan 260
Patrícia Menezes Santos 623, 751
Paula Leticia Souza de Moura 107
Paulino Ribeiro Villas-Boas 222, 229, 234
Paulo Cesar Tonin 107, 140
Paulo Estevão Cruvinel 115, 657
Paulo Roberto Ferreira Junior 209
Paulo Sergio de Paula Herrmann Junior 75, 88, 280
Pedro Luiz de Paula Filho 140, 476
Pedro Oliveira Mokfa 314
Pedro Rodolfo Siqueira Vendrame 166, 797
Rafael Ehrich Pontes Ferreira 716, 724, 730
Rafael Galbieri 314, 376

Rafael Herrig Furlanetto 159
Rafael Vieira de Sousa 65
Rebeca Ribeiro Silvi 716, 724, 730
Regina Braga 677
Regis Sivori Silva dos Santos 140, 493
Renata Bulling Magro 509, 526
Renata Vieira da Mota 543
Ricardo Antônio de Oliveira Machado 209
Ricardo da Cunha Lopes 596
Ricardo Fonseca Araujo 75, 88
Ricardo Rosendo de Castro 657
Ricardo Simão Diniz Dalmolin 239
Ricardo Sobjak 107, 140
Ricardo Yassushi Inamasu 52, 65, 75, 88, 314, 346, 368
Robélio Leandro Marchão 166, 797
Rodrigo Alberti 586, 596
Rodrigo Moreira Hoffmann 272
Rogério Costa Campos 172
Rogério Ferreira Aires 394
Roger Toscan Spagnolo 412
Ronaldo Pereira de Oliveira 38, 75, 88, 290, 428
Ropson Delavi Jendrzikowski 178
Rosemary Hoff 260, 554, 586, 596
Sandra Aparecida Santos 623
Sandro Manuel Carmelino Hurtado 297
Sérgio Raposo Medeiros 623
Silvia Maria Fonseca Silveira Massruhá ..... xi, vii
Silvio André Meirelles Alves 471, 493
Sophia Aparecida Morro Chamilete 736
Stefan Domingues Nachtigall 193
Suzana Lucy Nixdorf 44
Tales Tiecher 248
Tauã Milech Cabreira 209
Teresa Cristina Alves 736, 789
Thaís Basso Amaral 647
Thaís Martins Mariano 388
Thassio Monteiro Menezes da Silva 532, 543
Thiago Teixeira Santos 75, 88, 129
Thierry Becquer 797
Thierry Ribeiro Tomich 716, 724, 730
Thor Vinicius Martins Fajardo 554
Tiago Cyrino Carrashi 159

Valdemar Vicente Graciano Neto 677
Valéria de Oliveira Faleiro 403
Vandoir Bourscheidt 773
Vanessa Amorim Teixeira 716, 724, 730
Victória Reis Bortoluz 255
Vilma Alves de Oliveira 115
Vinícius Câmara Costa 222
Vitor Akihiro Hisano Higuti 97
Wagner Arbex 677
Waldomiro Barioni Júnior 623, 657, 665
Walter Quadros Ribeiro Junior 88
Washington Luiz de Barros Melo 657
Wesley Nunes Gonçalves 52
Wneiton Luiz Gomes 677
Ziany Neiva Brandão 40, 290, 331, 428

Apresentação

Dra. Silvia Maria Fonseca Silveira Massruhá[1]

[1] *Presidente da Embrapa*

A presente obra é um marco para a ciência agrícola nos trópicos ao evidenciar que os importantes avanços conquistados nas décadas passadas, que fizeram do Brasil o único país do mundo com agricultura diversificada e competitiva, foram fundamentais, mas fazem parte de um passado glorioso.

A ciência brasileira foi competente ao promover a tropicalização de plantas e animais originários de biomas de climas frios e temperados do hemisfério Norte, principalmente alicerçada em ciências como biologia, química, física, economia, matemática e estatística, e tendo como pilares ciências aplicadas como agronomia, medicina veterinária, zootecnia, sociologia e administração. Nesta nova etapa que se abre, um novo cenário surge, com o concurso da ciência de dados e da inteligência artificial, da engenharia de precisão e da eletrônica embarcada, sem perda de importância das ciências tradicionais.

A agricultura de precisão se consolida numa etapa fundamental, em que grandes desafios demandam respostas urgentes. As mudanças no clima trouxeram novos desafios para todas as culturas e biomas. Isso num ambiente em que se torna essencial aumentar a produção de alimentos, fibras e energias renováveis, num mundo em que a população cresce, principalmente em regiões de baixa escassez de recursos hídricos e solos férteis. Segurança alimentar deixou de ser assunto de Estado para ser do interesse de todos. Soma-se a isso a necessidade premente de resolver a questão da exclusão de parcela da população mundial em função da fome.

Há um novo desafio configurado, representado pela mudança no padrão de consumo, que é mundial. O mundo se urbanizou, a produção está distante dos consumidores, principalmente dos jovens, que trouxeram recentemente novas demandas, configurando um novo mindset. Biosseguridade, rastreabilidade, carbono zero, bem-estar animal são algumas das novas exigências, que vão além dos processos de produção tradicionais.

A agricultura de precisão e digital já vem apresentando soluções para todos esses novos desafios, pois possibilita aumentar a produção de alimentos a custos declinantes, buscando contribuir, com o monitoramento cada vez mais preciso de plantas, animais e do meio ambiente, para o melhor enfrentamento do desafio do clima.

Ao reunir tecnologias e resultados efetivos, obtidos na aplicação de agricultura de precisão e digital ao cultivo de grãos, plantas perenes e na pecuária, esta obra será de utilidade extrema para diferentes públicos. O conhecimento contido interessa a acadêmicos, tomadores de decisões públicas e privadas e produtores empreendedores. Este livro, na forma como seu conteúdo está magistralmente organizado e apresentado, surge como um divisor de águas no tema e será fundamental para renovar os laços de ciência e empreendedorismo, pilares que sustentam a eficiente e competitiva agricultura brasileira há décadas.

Aos autores da Embrapa e de instituições parceiras: estejam certos de que deram incomensurável contribuição ao Brasil e ao mundo tropical, renovando as esperanças de que continuaremos a ser uma nação provedora de novas soluções para desafios que se apresentam.

Agricultura de precisão: um novo olhar na era digital

Jose Paulo Molin[1]

[1] *Professor Titular, Departamento de Engenharia de Biossistemas, Laboratório de Agricultura de Precisão, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba (SP), Brasil*

Podemos tomar diferentes marcos para definir o início da agricultura de precisão (AP), no mundo e no Brasil. O fato é que o termo Precision Agriculture se consolida dentre os demais em meados da década de 1990. No Brasil, também podemos elencar alguns fatos marcantes para determinar o seu início, e um deles foi o surgimento da prestação de serviços pelo que na sequência se consolidou como um modelo de negócio desenhado pelo surgimento das consultorias em AP, entre 2001 e 2002.

A pesquisa, obviamente, deu seus primeiros passos alguns anos antes e tivemos inclusive eventos realizados por aqui ainda no final do século passado. Dentro da Embrapa não foi diferente, e várias iniciativas convergiram para a criação, em 2009, da Rede de Agricultura de Precisão da Embrapa, e estivemos juntos em São Pedro-SP, em abril de 2010, na Convenção da Rede.

Não tardou e em 2011 era entregue ao público o livro *Agricultura de precisão: um novo olhar*, com a primeira coletânea de relatos dos trabalhos da Rede. Em 2014 era disponibilizado o segundo livro, *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Agora temos a grata satisfação de apreciar o terceiro livro desta brilhante sequência, intitulado *Agricultura de precisão: um novo olhar na era digital*.

Muito pertinente esse olhar para a era digital, pois a AP, que produziu as primeiras inserções digitais no campo, depende fortemente dos avanços nas soluções digitais para alavancar práticas de campo ao mesmo tempo mais assertivas e escaláveis. A obra contempla e destaca essa transição e ao mesmo tempo, convenientemente, mantém aqueles agrupamentos (tecnologias, culturas anuais, culturas perenes) e avança em novas frentes.

As tecnologias, que evoluem, são abordadas em um amplo espectro de tópicos em que se destacam equipamentos, automação, robótica, ciência de dados, inteligência artificial e outros. Na definição estabelecida pela Sociedade Internacional de Agricultura de Precisão (ISPA), a AP é caracterizada como uma estratégia de gestão e não como conjunto de tecnologias. Mas, para uma boa parcela da agricultura de hoje, a implementação de AP em larga escala somente se viabiliza com tecnologias e automação.

As culturas anuais representam a maior parcela da atividade agrícola no Brasil, e nestas a produção mais sustentável ainda pode contar com muitas contribuições do âmbito da AP. A pesquisa já contribui e demonstra, ainda, poder auxiliar o produtor a ser mais assertivo e ao mesmo tempo promover a geração de produtos e serviços nacionais em um novo patamar. Mas é marcante a contribuição que a obra oferece no contexto das culturas perenes, em especial da maçã e na viticultura.

Ainda, mencionando a ISPA que, em recente atualização da conceituação de AP, inclui e destaca a pecuária. Alinhada a esse movimento, esta obra adiciona a temática e traz uma diversidade de estudos na área, contemplando, ainda, os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPFs), mais complexos e desafiadores para a AP.

Nossos sinceros cumprimentos à grande equipe da Rede de Agricultura de Precisão da Embrapa pelo brilhante trabalho. E boa leitura a todos!

Perspectivas e tendências na Agropecuária de Precisão e Digital: uma análise da presente obra por rede semântica

Ivan Bergier[1,2], Fernanda Figueiredo Granja Dorileo Leite[3], Eduardo Antonio Speranza[4,5], Silvia Maria Fonseca Silveira Massruhá[6]

[1] *Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, ivan.bergier@embrapa.br*
[2] *Câmara de Agricultura Digital da Associação Rede ILPF, Brasília (DF), Brasil*
[3] *Câmara de Agricultura Digital da Associação Rede ILPF, Brasília (DF), Brasil, fernandagranja@redeilpf.org.br*
[4] *Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, eduardo.speranza@embrapa.br*
[5] *Câmara de Agricultura Digital da Associação Rede ILPF, Brasília (DF), Brasil*
[6] *Presidência da Embrapa, Brasília (DF), Brasil, silvia.massruha@embrapa.br*

A presente obra, apoiada pela Câmara Temática de Agricultura Digital da Associação Rede Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), tem por objetivo fomentar a incorporação de novas tecnologias de precisão e digital nos sistemas de produção animal e vegetal, ampliando a disponibilidade de dados digitais e promovendo ganhos de eficiência e sustentabilidade na agropecuária brasileira. A Associação Rede ILPF é hoje composta e cofinanciada pelas empresas Bradesco, Cocamar, John Deere, Minerva Foods, Soesp, Suzano, Syngenta, Timac Agro e Embrapa. Criada em 2012, tem a missão de promover avanços na agropecuária por meio da adoção de tecnologias de ILPF. Entre as frentes de trabalho, destacam-se o mapeamento e a difusão dos sistemas integrados no território nacional, apoio à pesquisa e desenvolvimento, capacitação e transferência de tecnologias, bem como a promoção de relações institucionais, governamentais e de comunicação. A Rede ILPF desenvolve ações em diversas regiões e biomas do país, executando projetos com recursos de financiadores externos e apoiando uma rede com 16 Unidades de Referência Tecnológica (URT) e 12 Unidades de Referência Tecnológica e de Pesquisa (URTP), e com a participação de 22 Unidades Descentralizadas e Centralizadas da Embrapa.

A temática deste livro é fortemente alinhada a priorizações de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação da Embrapa, descritas em seu VII Plano Diretor (2020-2030). Dentre as prioridades, destacam-se "Agricultura digital, rastreabilidade e logística associadas aos sistemas produtivos agrícolas: monitoramento, inteligência e otimização nos sistemas produtivos agropecuários e agroindustriais por meio da automação de processos e gerenciamento espaço-temporal na cadeia de valor'" (EMBRAPA, 2020). Além disso, um dos objetivos estratégicos para a década 20-30 é justamente "otimizar os sistemas produtivos agropecuários e agroindustriais por meio da automação de processos e da agricultura de precisão e digital'", aumentando ainda mais a relevância desta obra no contexto atual. A Embrapa possui, ainda, a missão de promover o compartilhamento de dados e informações entre atores e elos das diversas cadeias produtivas por meio de plataformas de dados, como a Plataforma AgroAPI (https://www.embrapa.br/agroapi) e o Repositório de Dados de Pesquisa da Embrapa (https://www.redape.dados.embrapa.br), facilitando o desenvolvimento de soluções digitais para a tomada de decisão com base em *big data* e ferramentas de aprendizado de máquina. Busca-se, assim, a promoção da criação e uso de algoritmos inteligentes por agentes públicos e privados para identificar

novas tendências, nichos de mercado e demandas dos diversos elos das cadeias de valor, com foco na sustentabilidade.

Uma análise contextualizada do conteúdo desta obra (títulos dos capítulos) é sintetizada e apresentada na forma de grafo de uma rede semântica (Figura 1). Os recentes avanços da Ciência da Computação têm promovido o desenvolvimento de tecnologias de softwares e hardwares com grande impacto sobre a produtividade de sistemas agropecuários no Brasil. A Agricultura de Precisão foca no desenvolvimento e uso de tecnologias, como sensores de condutividade elétrica aparente do solo, sensores de radiação visível e infravermelho próximo (Vis-NIR), espectroscopia a laser (LIBS), narizes eletrônicos para a detecção de gases, dentre outros, sendo que alguns podem estar embarcados em satélites, aeronaves remotamente pilotadas (ARPs) - popularmente conhecidas por drones, e nas próprias máquinas agrícolas, sendo capazes de capturar uma grande quantidade de dados em magnitudes espaço-temporais muito diminutas (centímetros e segundos). Essa miríade de dados, quando adequadamente combinada e integrada por sistemas e plataformas computacionais, permite a análise de massas de dados por modelos poderosos de aprendizado de máquina, como, por exemplo, redes neurais convolutivas (CNN), que compõem o estado da arte na área de Inteligência Artificial (IA). O uso eficiente da IA em atividades de Agricultura de Precisão e Digital permite a conversão de dados em informação, oferecendo suporte à tomada de decisão pelo produtor.

As aplicações da Agricultura de Precisão e Digital são inúmeras. Nesta terceira edição, destacam-se a correção e a melhoria da fertilidade e dos teores de matéria orgânica dos solos, o controle biológico, a disponibilidade hídrica, a fenotipagem, a nutrição e ajustes de fatores edafoclimáticos visando ganhos expressivos no rendimento de culturas.

Para as culturas anuais, destacam-se aplicações para soja, milho e algodão, especialmente no Bioma Cerrado. Destacam-se aplicações de aprendizado de máquina sobre imagens orbitais, na magnitude espaço-temporal de metros e dias, especialmente por meio de índices de vegetação na faixa espectral do infravermelho (NDVI). Mapas georreferenciados de NDVI permitem avaliar o vigor da vegetação através do uso de algoritmos de IA (a exemplo do *Random Forest*) para o ajuste adequado de adubação mineral (NPK) e o controle de pragas. *On-farm experiments* são de suma importância para a calibração de sensores orbitais, bem como para a validação de tecnologias de precisão e digitais de campo.

Para as culturas perenes, como café, cana-de-açúcar, fruticultura, viticultura e silvicultura, destacam-se tecnologias de poda mecanizada, armadilhas de pragas, telas de proteção a extremos climáticos, bem como recomendações fitossanitárias e tecnologias para aumento de rendimento, qualidade e agregação de valor a produtos.

No que tange à pecuária de precisão, destacam-se aplicações para gado de corte e de leite, bem como para pastagens. A eletrônica aqui ganha destaque, como foco em automação e aquisição de dados para Sistemas Informatizados de Gestão da Fazenda (FMIS). Verificam-se avanços e desafios no manejo automatizado dos animais para alimentação e ordenha, a identificação e caracterização sanitária individual por imagens capturadas por câmeras instaladas em drones ou por câmeras termográficas, e dispositivos de internet das coisas (IoT) e de identificação por radiofrequência (RFID). A percepção do produtor tem sido importante na customização dessas tecnologias, bem como para a compatibilização de normas elaboradas pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa).

Com relação às pastagens, drones imageadores têm auxiliado no aumento de ganhos de produtividade da pecuária, especialmente quando combinados em sistemas de integração com lavoura (ILP) ou floresta (IPF). As tecnologias de precisão e digitais possuem papel de relevo nos sistemas ILPF por tratar-se de estratégia de pro-

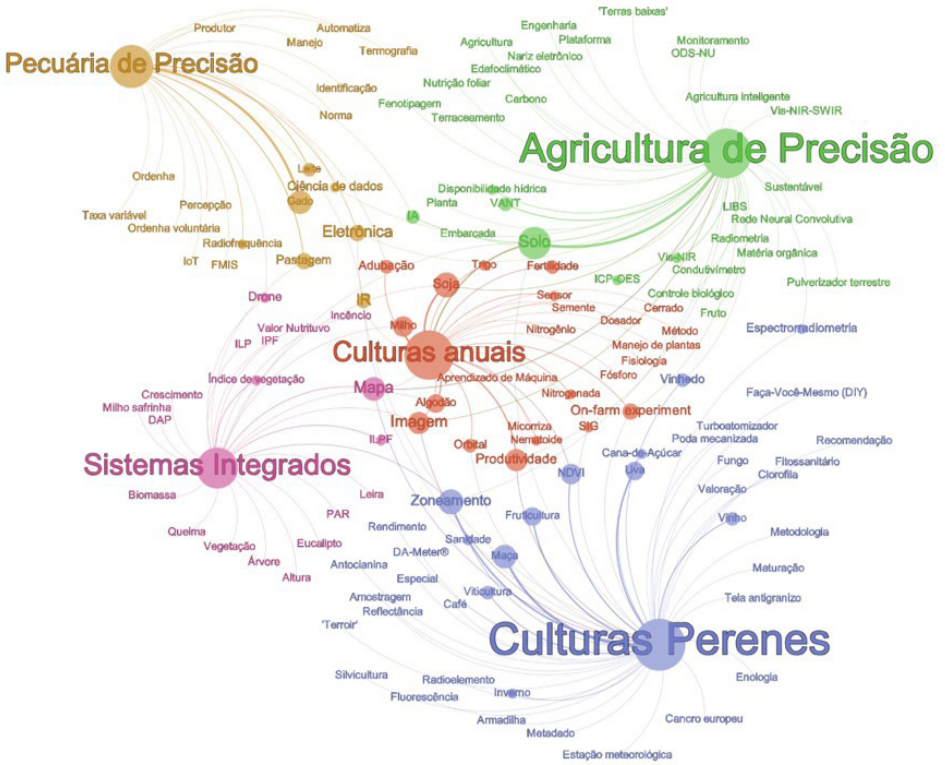


Figura 1. Principais aplicações e oportunidades de avanços na agropecuária de precisão e digital, sintetizadas em um grafo que combina temas gerais e títulos dos capítulos contidos nesta obra.

dução que integra diferentes sistemas produtivos, agrícolas, pecuários e florestais dentro de uma mesma área. Pode ser feita em cultivo consorciado, em sucessão ou em rotação, de forma que haja benefício mútuo para todas as atividades. Esta forma de sistema integrado busca otimizar o uso da terra, elevando os patamares de produtividade, diversificando a produção e gerando produtos de qualidade. Com isso, reduz-se a pressão sobre a abertura de novas áreas de exploração agropecuária. Estes sistemas têm o potencial de converter áreas de pastagens degradadas em altamente produtivas, mediante investimentos e uso combinado de boas práticas agropecuárias e de tecnologias da agricultura de precisão e digital. As vantagens estão na melhoria da eficiência geral dos serviços ambientais na propriedade por meio de uma gestão por talhões. A adoção de sistemas integrados em boa parte do Brasil deve aumentar a produção de biomassa vegetal, bem como melhorar os estoques de carbono no solo, ajudando na mitigação das mudanças climáticas. Estes sistemas também são vistos como mais resilientes e também podem ser usados como forma de adaptação às mudanças climáticas, que trazem desafios, especialmente em relação à prevenção a períodos prolongados de estiagem e a incêndios de grandes proporções.

Por fim, a agropecuária inteligente baseada em dados deverá conferir ao Brasil grandes avanços em produtividade, especialmente se guiada pela perspectiva dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas (ODS-NU), por meio da melhoria da qualidade de vida de famílias no campo e do aumento ao acesso a conectividade, educação e capacitação digital, visando atingir os três pilares da sustentabilidade: social, ambiental e econômico. A Rede ILPF agradece a todos os autores que contribuíram com esta obra com recomendações importantes para um novo olhar para a agricultura de precisão e digital. Com toda certeza, o conhecimento reunido aqui será de grande valia para aqueles que buscam aprofundar-se no assunto e ampliar os horizontes sobre a transformação digital na agricultura.

REFERÊNCIAS:

EMBRAPA. **VII Plano Diretor da Embrapa:** 2020–2030. Brasília, DF: Embrapa, 2020.

Agricultura de precisão: perspectiva histórica e de constante transformação

Precision agriculture: historical perspective and constant transformation

Ricardo Yassushi Inamasu[1], Alberto Carlos de Campos Bernardi[2], Carlos Manoel Pedro Vaz[3], João Leonardo Fernandes Pires[4], Luciano Gebler[5], Lúcio André de Castro Jorge[6], Luís Henrique Bassoi[7]

[1] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, ricardo.inamasu@embrapa.br*
[2] *Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alberto.bernardi@embrapa.br*
[3] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, carlos.vaz@embrapa.br*
[4] *Pesquisador, Embrapa Trigo, Passo Fundo (RS), Brasil, joao.pires@embrapa.br*
[5] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br*
[6] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, lucio.jorge@embrapa.br*
[7] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, luis.bassoi@embrapa.br*

RESUMO

Embora a agricultura de precisão (AP) tenha raízes em iniciativas de mais de duas décadas, seu marco oficial na Embrapa ocorreu com a publicação do primeiro volume "Agricultura de Precisão: um novo olhar". Essa obra pioneira propôs uma visão abrangente e agronômica da AP, contrastando com a ênfase inicial baseada em máquinas e equipamentos. O presente capítulo aprofunda essa discussão, diferenciando a AP da agricultura digital e destacando o papel crucial da AP nesse cenário em constante evolução. Por meio de uma análise histórica, desde as origens até a indústria 4.0, o capítulo descreve o processo de amadurecimento dos conceitos da AP e sua relevância na transformação digital da sociedade moderna.

Palavras-chave: agricultura de precisão; agricultura digital; agricultura 4.0; agricultura 5.0; agricultura inteligente.

ABSTRACT

Although Precision Agriculture (PA) has roots in initiatives of more than two decades ago, its official milestone came with the publication of the first volume, "Precision Agriculture: a new look". That pioneering work proposed a comprehensive and agronomic vision of PA, contrasting with the initial emphasis on machines and equipment. This chapter deepens such discussion, differentiating AP from Digital Agriculture and highlighting the crucial role of AP in this constantly evolving scenario. Through a historical analysis, from its origins to Industry 4.0, the chapter traces the maturing process of PA concepts and their relevance in the digital transformation of the modern society.

Keywords: precision agriculture; digital agriculture; agriculture 4.0; agriculture 5.0; smart farming.

1 INTRODUÇÃO

A presente obra é o terceiro livro da Rede de Pesquisa em Agricultura de Precisão. Assim como nos demais, a publicação é resultado de um esforço organizado em rede. É próximo a um relatório técnico, mas, para o público em geral, pode ser uma referência de como a Embrapa e um conjunto amplo de parceiros de diferentes setores ligados à AP estão tratando o tema. A temática é abrangente e, desde o primeiro

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000003

volume, explicita-se que a AP não é limitada a um tipo de cultura nem a uma região, mas ela é um conceito de gestão do sistema de produção agropecuário que leva em conta a variabilidade espacial e temporal do sistema de produção. Ela trouxe a visão de que é possível otimizar o uso da variação existente mesmo em área de um talhão de pequenas e médias propriedades. Porém, é importante salientar que é necessário que haja variabilidade da produtividade ou na qualidade na área considerada. Não havendo a variabilidade, a agricultura convencional, que trata a área de forma a desconsiderar a dependência espacial, pode ser vantajosa economicamente.

Na área da pecuária é possível aplicar o mesmo conceito aplicado à agricultura. Parte-se da premissa de que há variabilidade entre indivíduos ou subgrupos se feita analogia com as zonas de manejo. Portanto, o desafio é como na agricultura e busca identificar a intensidade da variação e mensurá-la para obter indicativos consistentes de que há potencial de retorno econômico ao tratar essas diferenças de forma adequada. A pecuária também é parte de sistemas integrados (com componentes agrícolas e florestais) onde a variabilidade espacial é fator importante para manejo. Portanto, para além dos indivíduos ou subgrupos, a pecuária de precisão necessita do entendimento de sistemas complexos, que também representam oportunidades de ganhos financeiros e ambientais, se bem explorados.

Tanto na pecuária como na agricultura, havendo retorno econômico em tratar as diferenças, o ganho com o meio ambiente é praticamente automático, pois faz-se um uso mais eficiente dos insumos. Sendo assim, as necessidades das culturas são mais bem atendidas do que na agricultura convencional. Cabe ressaltar que o conceito da AP contempla também a pecuária de precisão, uma vez que o termo *agriculture (*língua inglesa) já inclui a produção de origem animal. É um conceito convergente com a comunidade internacional consolidado pela Sociedade Internacional de Agricultura de Precisão a ISPA[1] (*International Society of Precision Agriculture*), cuja definição foi atualizada em março de 2024:

"Agricultura de precisão é uma estratégia de gestão que reúne, processa e analisa dados temporais, espaciais e individuais de plantas e animais e os combina com outras informações para apoiar as decisões de gestão de acordo com a variabilidade estimada para melhorar a eficiência no uso de recursos, produtividade, qualidade, rentabilidade e sustentabilidade da produção agropecuária".

2 AGRICULTURA DE PRECISÃO: ORIGEM DOS CONCEITOS

Uma questão recorrente dos provedores das tecnologias e dos setores que fornecem máquinas e equipamentos é se a robótica e outras tecnologias são adequadas ou não quando a intensidade da variabilidade é pouco significativa. É importante salientar que o termo "precisão", que é a capacidade de um instrumento de medição apresentar resultados consistentes, ou seja, sempre iguais, quando usados nas mesmas condições, é um termo muito precioso para a engenharia. Ainda nas décadas de 1970 e 1980, a precisão era um fator importante de competitividade das indústrias como, por exemplo, a automobilística. O rápido atendimento às demandas dos consumidores, bem como a eficiência denotada por entregas de componentes precisos, garante a superioridade tecnológica em um mercado competitivo. Os conhecimentos mais avançados foram explorados e integrados incluindo as tecnologias de produção para assegurar a qualidade do produto (Leach; Smith, 2018). As tecnologias nascentes assistidas por computadores, em especial as programáveis, ajudaram a posicionar os produtos e o próprio parque de máquinas industriais nos patamares de destaque. Talvez por esse motivo esses tipos de tecnologias foram muito admirados pelos entusiastas da inovação (Evans, 2012).

[1] Disponível em: https://www.ispag.org/about/definition. Acesso em: 12 jan. 2024.

Na indústria de máquinas agrícolas, por ter uma tolerância maior nas medidas dimensionais, a tecnologia da precisão chegou aos produtos nas décadas de 1980 e 1990. Pode-se dizer, desse modo, que o termo utilizado na agricultura de "precisão" foi trazido da indústria, devido, não apenas pelo encanto, mas pelo conceito de integração dos vários conhecimentos para alcançar uma solução equilibrada convergindo tecnologias de diferentes origens como a óptica, a microeletrônica, entre outras.

Particularmente na agricultura, se a aplicação de insumos à taxa variada possibilitou uma variação, digamos de 30% durante essa operação, se o erro aceitável para esse novo ajuste fosse de 10%, ou seja 10% de 30%, então o erro total não deve ser maior do que 3%, exigindo, assim, maior precisão das máquinas. Apesar de desejável, as máquinas não são entregues pelos fabricantes com a especificação desse tipo de erro. Existem argumentos para que esses erros não estejam explícitos na especificação do catálogo do produto. Uma delas é a qualidade dos insumos, principalmente os sólidos, que depende da uniformidade e da umidade dos grãos, o que interfere nas massas e consequentemente na qualidade de distribuição. Assim, mesmo nos dias de hoje, é fundamental a calibração no campo pelos usuários antecipando o uso.

No passado, muitos argumentavam que antes da agricultura de precisão era necessária a "precisão na agricultura". Apesar de ser uma frase de efeito já de uso rudimentar, continua verdadeira, mesmo em publicações recentes, a precisão das máquinas é lembrada como, por exemplo, por Ferraz (2023), que ocupou a presidência da Associação Brasileira de Agricultura de Precisão e Digital – AsBraAP. A melhoria da agricultura convencional deve preceder o uso dos conceitos da AP. Assim, o destaque ao termo "precisão" mesmo não havendo a variabilidade no campo é muito válido aos fabricantes. Talvez esse seja um ponto importante para observar a divergência nos conceitos básicos da área de conhecimento. Na engenharia de precisão, houve um esforço histórico para reduzir a probabilidade de ocorrência de eventos que poderiam impedir que as peças projetadas não deixassem de cumprir o objetivo como encaixar umas nas outras. Dessa forma, a engenharia de precisão é definida atualmente como uma ciência determinística que tenha a variância do erro reduzida a limites aceitáveis. A margem para que exista uma possibilidade ou probabilidade de um erro na montagem deve ser reduzida a um mínimo a ponto de as variações dimensionais não mais serem considerados erros por estarem dentro do valor tolerável.

O setor industrial, com os conceitos de qualidade e precisão, principalmente o mercado de máquinas e equipamentos, trouxe a inferência de que a agricultura de precisão é a engenharia de precisão aplicada às máquinas e equipamentos agrícolas. Também é fato que o Sistema Global de Navegação por Satélite – GNSS e a engenharia de precisão viabilizaram a agricultura de precisão como nós conhecemos atualmente. Essa discussão está descrita na publicação de 1997 em uma comissão organizada pela academia de ciência dos EUA, National Research Council (National Research Council, 1997), quando publicaram a primeira definição de AP, com a seguinte delimitação (tradução livre):

"A agricultura de precisão é uma estratégia de gestão que utiliza tecnologias de informação para reunir dados de diversas fontes e auxiliar na tomada de decisões relacionadas à produção agrícola" (National Research Council, 1997).

A definição do NRC trazia assim as duas dimensões da AP: a dimensão da gestão do sistema produtivo agropecuário e a dimensão das tecnologias que habilitavam essa gestão. Ou seja, a dimensão do setor industrial e a dimensão agronômica dentro de um sistema de produção agropecuária de forma geral. A gestão da variabilidade espacial e individual de plantas e animais estava apenas implícita na "produção agrícola" e não explicitava como na definição atual da ISPA. Essa versão permite interpretar que ao aplicar tecnologia de informação poderia ser considerado prá-

tica de agricultura de precisão. Ainda antes do primeiro livro da Rede AP, a visão predominante da agricultura de precisão no Brasil era a dimensão das tecnologias habilitadoras da engenharia de precisão. A rede de pesquisa da Embrapa trouxe a dimensão agronômica, como um resultado de organização da instituição na temática, o que permitiu que mais de 20 centros de pesquisa e demais parceiros atuassem nesse tema apoiando os produtores a entenderem a sua própria necessidade.

Diferentemente da área industrial, a agricultura deve conviver com as variações de comportamento do clima e dos seres viventes, justamente por estes não serem controláveis, e aceitar a possibilidade de haver variações no volume da safra. Ou seja, não permite ser determinística. A AP busca, também, reduzir essa variação, separando parâmetros controláveis e não controláveis e seus custos, fazendo o uso de ferramentas como sensoriamento e geoestatística. Os fatores não controláveis, apesar de inevitáveis, seus efeitos podem ser minimizados e devem ser aceitos como parte do ambiente de produção, o que difere da postura da engenharia de precisão. Essa distinção foi posicionada nas duas primeiras obras da Rede AP como "um novo olhar" (Inamasu et al., 2011; Bernardi et al., 2014).

A AP como um novo olhar foi apresentada como "uma postura gerencial que considera a variabilidade espacial para maximizar o retorno econômico e minimizar efeito ao meio ambiente". É importante lembrar que a dimensão agronômica da AP é intuitiva e não é nova. Linsley e Bauer (1929) apresentaram o conceito da variabilidade de acidez do solo e a necessidade diferenciada de corretivo.

Sem essa clareza no conceito, a área da agricultura de precisão não cria desafios para que a ciência, principalmente a agronômica, possa atuar de forma decisiva na evolução e estabelecer critérios agronômicos para o usuário, no caso o produtor rural, contabilizar qual a expectativa de retorno econômico ao adquirir uma máquina de aplicação à taxa variada. O estudo e o entendimento de fatores agronômicos que influem e determinam o ganho ao tratar a variabilidade espacial da propriedade são fundamentais para o incremento da sustentabilidade econômica, social e ambiental da atividade nos sistemas de produção agropecuária por meio de dispositivos tecnológicos. Assim, os conceitos amadureceram, e tecnologias como receptores GNSS e sistemas de informação geográfica (SIG) estão agora presentes em dispositivos móveis. A engenharia de precisão e a integração de diversas tecnologias de áreas distintas, apesar dos grandes desafios, continuam a se destacar como habilitadoras essenciais da agricultura de precisão (AP).

Atuar em uma área com um número elevado de interfaces como a AP implica em conviver com uma diversidade de conceitos. Para os iniciantes, essas diferenças sutis podem causar dificuldades no entendimento, mas sugere-se mergulhar em diferentes conceitos para compor um conceito convergente das tecnologias e aplicá-las de forma que a direção seja decisiva para o avanço da agricultura.

A Embrapa adota a definição de AP da ISPA. No entanto, há uma parcela considerável do mercado formado por agritechs que entendem que os dispositivos habilitadores sendo associados à produção agrícola e pecuária possam igualmente ser chamados de agricultura de precisão. Diante desse uso corrente, publicações como a pesquisa da SAE BRASIL e KPMG (2024) adotam o conceito que foi denominado de "agricultura de precisão estendida", onde as tecnologias habilitadoras ou potencialmente habilitadoras entram no escopo e podem ser posicionadas como "um novo olhar na era digital".

Na área acadêmica, a evolução da AP tem sido produtiva e crescente. A consulta realizada em 11 de abril de 2024, na base Web of Science, *core collection*[2], utilizan-

[2] Disponível em: www.webofscience.ez103.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/basic-search. Acesso em: 24 jan. 2024.

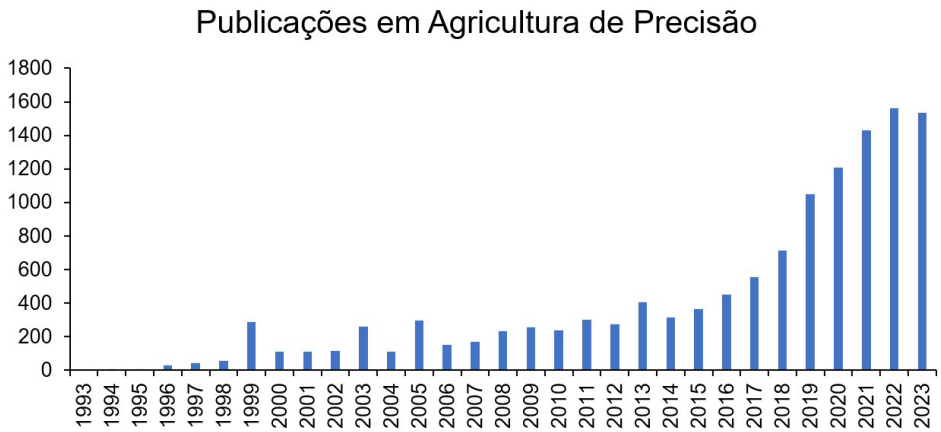


Figura 1. Número de publicações em "Agricultura de Precisão" na base da Web of Science por ano no período de 1993 até 2023.

do-se as palavras chaves "precision agriculture" ou "precision farming", resultou em um total de 12.656 documentos entre 1993 e 2023 (Figura 1).

Do total de publicações recuperadas, 8.151 eram artigos originais em revistas e 3.875 eram artigos em anais, entre outras publicações científicas (Figura 1). As publicações foram encontradas em 150 categorias da Web of Science, ou seja, em um número elevado de áreas de publicação, reforçando a multidisciplinaridade do tema e a importância da integração e a dificuldade na uniformização dos termos e entendimentos. As dez que se destacaram nessas 150 categorias são: Agricultura Multidisciplinar com 2.624 publicações, Agronomia com 1.731, Engenharia Elétrica Eletrônica com 1.709, Sensoriamento Remoto com 1.654, Engenharia Agrícola com 1.501, Ciências Ambientais 1.298, Aplicações Interdisciplinares de Ciência da Computação 1.101, Ciência da Imagem Tecnologia Fotográfica 909, Ciência do Solo 819 e Sistemas de Informação em Ciência da Computação 774.

Ao analisar as ocorrências das palavras-chave dessas publicações (745), utilizando a ferramenta de análise VOSviewer com os dados da Web of Science obtidos em 11 de abril de 2024 e agrupando áreas e suas relações por métodos padrão da ferramenta, foi possível separar cinco grandes grupos ilustrados na Figura 2:

- Sensoriamento remoto com destaque aos índices de vegetação das culturas (em vermelho);
- Gestão da propriedade, produção, adoção e sustentabilidade (em verde);
- Tecnologias de automação, máquinas e sistemas (em azul);
- Variabilidade espacial, geoestatística, solo e fertilidade (em amarelo);
- Tecnologias e metodologias de informação e seu processamento (roxo).

A ferramenta ainda viabiliza a análise de inter-relação e a interdependência dos assuntos. Um mapa com esse número de publicações esconde um número igual de assuntos e abordagens. Aos não acadêmicos, observa-se que o presente livro pode ser visto como uma fração desses trabalhos, onde os capítulos podem referenciar e compilar apenas algumas dessas publicações.

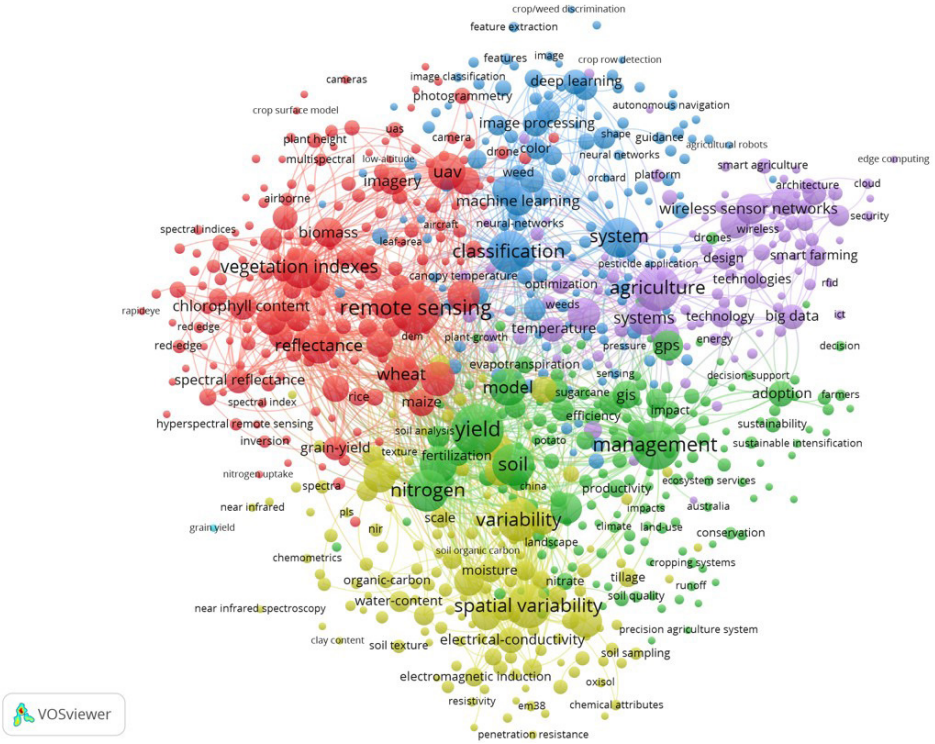


Figura 2. Áreas relacionadas com agricultura de precisão. Figura exportada do VOSViewer, agrupado por método padrão da ferramenta.

3 INDÚSTRIA 4.0: ORIGEM DOS CONCEITOS E INSPIRAÇÃO PARA A AGRICULTURA 4.0

O processo de amadurecimento conceitual que ocorreu no início da agricultura de precisão, quando um número elevado de definições e diferentes interpretações foi apresentado, está ocorrendo agora com a chamada agricultura 4.0. Publicações de várias naturezas abordam a "nova fase" da agricultura, como a agricultura digital, agricultura inteligente (*Smart Agriculture*), agricultura 4.0, agricultura 5.0, entre outras. Dentre essas variadas terminologias é importante concluir esse ciclo da agricultura de precisão para uma nova era digital.

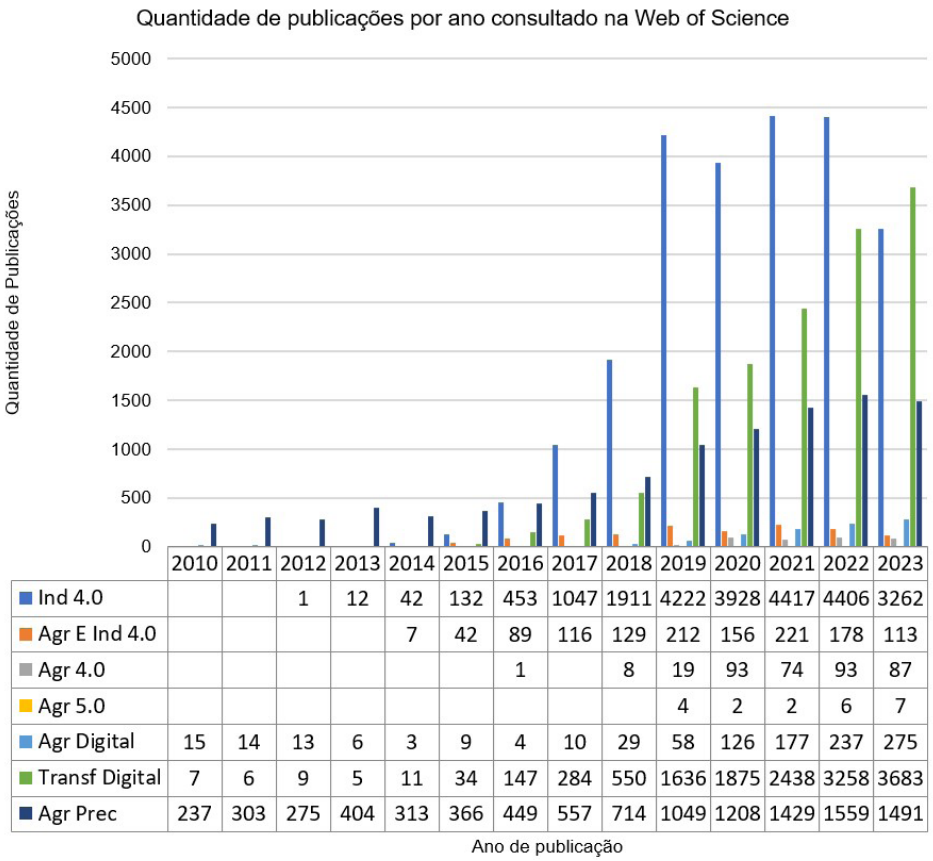
Percebe-se o esforço da comunidade na divulgação da agricultura digital buscando ilustrar o potencial avanço da agricultura em direção a um novo patamar tecnológico. Nesse esforço, surgem contribuições como a agricultura 4.0, agricultura digital (Queiroz et al., 2020; Massruhá et al., 2020), agricultura 5.0 (Leite et al., 2023), agro 4.0 (Dias et al., 2023; Brasil, 2021), *Digital Farming* (Dörr; Nachtmann, 2022), entre outros conceitos. Como foi na agricultura de precisão, há vertentes, dentro de um conjunto de ideias e de produtos tecnológicos originados da academia, mercado, indústria, setores de serviços e consultoria. Nesse ambiente de criação, ainda em processo de convergência, há dois aspectos em comum que podem ser chamados de grandes vertentes. A primeira é a influência da transformação digital que a sociedade como um todo está vivenciando. Essa transformação é uma mudança cultural que promove inovações nos meios de organização da sociedade e nos sistemas de produção. Nessa mudança global, a agricultura não está alheia. A segunda é a vertente impulsionada pela "*Industrie* 4.0" (Kagermann et al., 2013) e a consequente e propalada quarta revolução industrial (Schwab, 2018; Schwab; Davis, 2018). A primeira nós estamos vivenciando. A segunda também, não deixa de ser uma consequência da transformação, mas é um processo com intenção de indicar uma direção nessa transformação.

A indústria 4.0 foi inicialmente um projeto proposto pela academia alemã em 2011. O projeto foi lançado em 2013 e expôs a pretensão de realizar uma transformação da sua indústria na dimensão que alcançasse a próxima revolução industrial (Kagermann et al., 2013). Lasi et al. (2014) expuseram, de forma sucinta e didática, o projeto alemão, motivo pelo qual é um dos mais citado pelos trabalhos que exploram a indústria 4.0. Após o lançamento pela Alemanha, segundo a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial – Unido (Speringer; Schnelzer, 2019), países reagiram ao projeto e lançaram os seus próprios, como os Estados Unidos – *Industrial Internet of Things* –, em 2011, Japão – *Society 5.0* –, em 2015, China – *Made in China 2025* –, em 2015, entre outros, motivando estudo de casos e explorando a externalidade de cada um desses projetos.

Em 2016, na reunião do Fórum Econômico Mundial em Davos, destacando o potencial de perda de milhões de empregos e de colocar à margem países notadamente menos desenvolvidos industrialmente, foi discutida a importância de haver um propósito e uma direção nessa transformação digital. A essa transformação, Klaus M. Schwab, fundador e presidente executivo do Fórum Econômico Mundial, denominou de "quarta revolução industrial" (Schwab, 2018) por acreditar que a transformação digital da sociedade em curso está no ponto de ruptura para uma nova revolução industrial. Essa discussão alertou os países dependentes tecnológicos que estavam alheios à transformação, por meio de uma divulgação menos especializada e mais adequada aos jornalistas não científicos e aos governantes, facilitando a compreensão da sociedade. De 2016 em diante, houve uma quantidade elevada de eventos que tratavam a temática da quarta revolução industrial. Nesse contexto, ocorre no Brasil o início da elaboração do Plano de Ação para o País em Internet das Coisas[3], por meio do MCTIC e BNDES, cujo resultado destacou três verticais prioritárias, uma delas a vertical rural. É nesse panorama de grande relevância para a indústria e com impacto social e econômico global que surgiram os termos como agro 4.0, visando comunicar a transformação da nossa agricultura em processo de modernização.

Recorrendo novamente à ferramenta de análises bibliométricas *Clarivate*, agora explorando a quarta revolução industrial e ilustrado na Figura 3, observa-se que a produção científica se intensifica após 2016. O rótulo "Ind 4.0" representa a quantidade de produção com busca utilizando a frase lógica "*Industry 4.0"* ou *"Industrie 4.0*". Os termos "Agr e Ind 4.0" contêm o número de documentos do rótulo "Ind 4.0", porém com o termo "*Agriculture"* citado em algum ponto do documento. Esse rótulo indica que, em 2015, 32% dos trabalhos acadêmicos em Indústria 4.0 mencionavam a agricultura. A partir de 2019, a proporção reduziu para 5%, o que pode indicar que os trabalhos na temática tornaram menos abrangentes e a agricultura, consequentemente, em uma área de publicação mais específica. Buscaram-se então os termos "agricultura 4.0" e "agricultura 5.0". Esse rótulo, na Figura 3, indica que a academia internacional não adotou esses termos (4.0 e 5.0) de forma significativa e não se percebe tendência de adoção. Porém, como mostra a Figura 1, houve uma tendência de crescimento em trabalhos na área com a agricultura de precisão e, como comparativo, os mesmos valores foram inseridos na Figura 3 para visualização. Ainda na mesma figura, observa-se que o aumento da frequência do uso do termo "agricultura digital". A ferramenta recuperou o primeiro uso científico desse termo em documento de 2002, antes da efervescência do uso do termo "4.0" utilizado para versionamento da revolução industrial. Porém, observa-se crescimento consistente, principalmente após 2016, como ocorreu com a agricultura de preci-

[3] Disponível em: https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/pesquisaedados/estudos/estudo-internet-das-coisas-iot/estudo-internet-das-coisas-um-plano-de-acao-para-o-brasil. Acesso em: 12 jan. 2024.



	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Ind 4.0			1	12	42	132	453	1047	1911	4222	3928	4417	4406	3262
Agr E Ind 4.0					7	42	89	116	129	212	156	221	178	113
Agr 4.0							1		8	19	93	74	93	87
Agr 5.0										4	2	2	6	7
Agr Digital	15	14	13	6	3	9	4	10	29	58	126	177	237	275
Transf Digital	7	6	9	5	11	34	147	284	550	1636	1875	2438	3258	3683
Agr Prec	237	303	275	404	313	366	449	557	714	1049	1208	1429	1559	1491

Figura 3. Número de publicações sobre indústria 4.0 na base da Web of Science (*core collection*) por ano no período de 2010 até 2023.

são, apesar de um número menor de trabalhos. Ainda na mesma figura foi inserido um termo que apresenta crescimento consistente que é a "transformação digital". É cedo para afirmar, mas é possível que os termos relativos à quarta revolução industrial possam ser ultrapassados e todos eles substituídos pelo termo "transformação digital" por ser esse o que representa o assunto motivador da "quarta revolução industrial".

Ainda sobre a Figura 3, observa-se que são contagens de publicação científica, e a transformação digital que a sociedade está presenciando envolve, além da academia, a sociedade civil, organização internacional, governo e setores privados, o que faz com que os termos ainda sejam utilizados de forma ampla, cada qual com uma interpretação mais adequada à sua visão. Entretanto, em um aspecto são concordantes: todos são influências das ferramentas digitais como avanço da microeletrônica, robótica, rede de computadores, internet, computação em nuvem, internet das coisas (IoT), sistemas ciberfísicos, grandes volumes de dados, big data, aprendizado de máquinas, inteligência artificial (IA), drones, veículos autônomos, impressão em 3D, nanotecnologia, biotecnologia, ciência dos materiais, armazenamento de energia, computação quântica, óptica, fotônica, *blockchain* etc. produzindo inovações no mercado com novos modelos de organização social e de negócios com redes sociais, *marketplace*, plataformas de streaming, plataformas de ensino e informação etc. convergindo para a construção de um futuro que possivelmente possa ser avaliado como a próxima revolução da sociedade, o que inclui a agricul-

tura. Essas tecnologias, assim como foi para a agricultura de precisão, são as que habilitam a convergência para a próxima agricultura.

Desde a edição da obra "Agricultura de Precisão: resultado de um novo olhar", em 2014, surgiram iniciativas e criação de instâncias governamentais para discussão e organização em apoio ao direcionamento da nova era digital para o agro brasileiro (Tabela 1). Em 2019, foi criada a Câmara Interministerial (MCTI e Mapa) do Agro 4.0. Nesse ano, a Embrapa estabeleceu o Portfólio Automação, Agricultura de Precisão e Digital[4], para governança de projetos nesses temas. Também, em 2019, a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão (CBAP) do Mapa incluiu digital na sua temática, sendo atualmente denominada de Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão e Digital (CBAPD)[5]. A Embrapa, em 2021, passou a denominar o "Centro Nacional de Pesquisa Tecnológica em Informática para Agricultura" com o nome síntese de "Embrapa Agricultura Digital"[6]. Em 2022 foi criada a Câmara Temática de Inovação Agrodigital[7] no Mapa. São nessas instâncias que as discussões e proposições de políticas públicas são realizadas, apoiando o aprimoramento das práticas e tecnologias de produção rural e da relação entre o campo e os demais segmentos e instituições da sociedade. No caso da Câmara Agrodigital, é composta por 53 entidades representativas da sociedade, o que faz do fórum uma instância ampla de discussão.

Posto a multiplicidade de abordagens e entendimento de diversos setores, foi solicitado à Gemini, ferramenta da Google AI, e à ChatGPT, da OpenAI, definir a agricultura digital, agricultura 4.0, agricultura 5.0, agricultura inteligente e agricultura de precisão, em 18 de abril de 2024, com a intenção de captar a base de conhecimento existente na internet naquele momento e a maneira como a comunidade, de certa forma, está entendendo cada um desses termos, compilados na Tabela 2.

As ferramentas Gemini da Google AI e ChatGPT da OpenAI trazem, em uma linguagem menos formal e utilizando fontes diversas disponíveis na internet, descrições palatáveis para os termos relacionados com AP. A descrição formal, por sua vez, é precisa e, na compreensão da academia, deve ser estruturada por uma organização representativa discutida por pares. A Tabela 2 traz essa descrição com rigor técnico mais leve ilustrando como a sociedade em geral pode estar entendendo.

Tabela 1. Iniciativas governamentais para discussão e organização da nova era digital para o agro brasileiro.

Iniciativa	Instância governamental	Ano de criação
MCTI e Mapa	Câmara Interministerial do Agro 4.0	2019
Embrapa	Portfólio Automação, Agricultura de Precisão e Digital	2019
Mapa	Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão (CBAP)	2019
Embrapa	Embrapa Agricultura Digital	2021
Mapa	Câmara Temática de Inovação Agrodigital	2022

Os termos como agricultura 4.0 e agricultura 5.0 trazem referência às tecnologias exploradas pelo projeto indústria 4.0 ou pelas tecnologias que são consideradas

[4] Disponível em: https://www.embrapa.br/pesquisa-e-desenvolvimento/portfolios. Acesso em: 12 jan. 2024.

[5] Disponível em: https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/pesquisaedados/estudos/estudo-internet-das-coisas-iot/estudo-internet-das-coisas-um-plano-de-acao-para-o-brasil. Acesso em: 12 jan. 2024.

[6] Disponível em: https://www.embrapa.br/en/agricultura-digital. Acesso em: 12 jan. 2024.

[7] Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/camaras-tematicas-1/inovacao-agrodigital. Acesso em: 12 jan. 2024.

responsáveis pela quarta revolução industrial com inferência de que também será responsável pela revolução da agricultura no próximo nível tecnológico. O 5.0, termo que infere o versionamento para um nível mais avançado do que o 4.0, surge no projeto "*Society 5.0*", em 2014, contrapondo a "*Industrie 4.0*", salientando que o projeto da Alemanha tem foco apenas na indústria, mas que seria importante ter uma visão mais ampla e que alcance uma transformação da sociedade como um todo, ou seja, na educação, sistema de saúde e em todos os setores incluindo a agricultura. Essa visão alimentou o conceito da quarta revolução industrial do Fórum Econômico Mundial. Ambas as ferramentas colocam como "evolução" do 4.0, mas, apesar de não se saber como será a quarta revolução industrial e ter-se apenas planos ou projeções, é possível entender que autores que utilizam esses termos pretendem apresentar uma visão transformadora diferenciada contrapondo ao que estava sendo descrito como uma próxima revolução industrial. O termo "*smart*" ou "inteligente" foi utilizado em dispositivos que passaram a executar uma automação mais sofisticada por meio de software, como foi o caso de elevadores inteligentes. Atualmente, as escalas aumentaram, e tecnologias como IA e IoT estão sendo utilizadas para o que tem sido entendido como prédios e cidades inteligentes. Na agricultura, a academia já vinha utilizando o termo "*smart*" ao associar aos processos que estão relacionados ao ambiente e foram aplicados em uma agricultura ambientalmente inteligente, mas, como presente na Tabela 2, as ferramentas de IA trazem o entendimento de que seria uma agricultura realizada com aplicação da IA. Para Gemini, a agricultura digital poderia ser entendida como a agricultura 4.0, e para ChatGPT o uso das tecnologias digitais. Se considerado que a quarta revolução industrial é o reflexo da transformação digital que a sociedade está passando, e que a agricultura não passará ilesa a essa transformação, a agricultura digital talvez seja a descrição ou o termo mais adequado para refletir o momento da efervescência tecnológica de grandes transformações inclusive culturais da atualidade. A indústria 4.0, como um projeto, possui alguns objetivos claros como a de implementar a integração vertical e horizontal das indústrias alemãs e parceiras; potencializar o nível elevado de conhecimento da população mesmo a de idade mais avançada; acelerar a economia circular tornando a indústria menos dependente da obsolescência, entre outros propósitos. A agricultura, por sua vez, parece possuir uma quantidade de iniciativas que são significativas, porém é desejável uma integração delas, e esta parece que vai ser alcançada com o aumento da maturidade das tecnologias e das instituições.

A agricultura brasileira tem os seus próprios desafios: resolver a insegurança jurídica das propriedades rurais, mitigar efeitos do clima e seus eventos inesperados, encurtar as cadeias aproximando os produtores dos consumidores, eliminar o uso de práticas insustentáveis com transparência, aproveitar a biodiversidade em bioinsumos e bioprocessos, fortalecer a inclusão socioprodutiva, posicionar a agricultura no seu papel justo da transformação da segurança alimentar e energética com lisura e responsabilidade. Se o Brasil aspira protagonismo pelas práticas agrícolas sustentáveis, e seus produtos posicionados como de primeira qualidade, não basta apenas praticar o sistema de plantio direto, a integração lavoura-pecuária, a proteção das suas reservas e biomas, é preciso acelerar o uso de bioinsumos, recuperar áreas degradadas, gerar certificados e relatórios ESG, entre outras iniciativas. O mundo hoje teme eventos climáticos extremos, perda da biodiversidade, colapso de ecossistemas, entre outros e, mais recentemente (de forma mais urgente), a desinformação (World Economic Forum, 2024), muito aceleradas pelas ferramentas digitais. Assim, a agricultura brasileira, além de praticar e desenvolver tecnologias sustentáveis, deve ser transparente e capaz de provar em tempo real que essas práticas estão sendo realmente aplicadas. Esses desafios só podem ser alcançados com base nos dados de qualidade e com apoio das novas tecnologias.

Tabela 2. Definições segundo Gemini da Google AI e ChatGPT da OpenAI.

Gemini da Google AI	ChatGPT da OpenAI
Agricultura digital	
A agricultura digital, também conhecida como agricultura 4.0, marca a inserção de ferramentas digitais no campo. Sensores, GPS, internet das coisas (IoT) e big data se unem para coletar e analisar dados da lavoura, permitindo uma gestão mais precisa e eficiente. Imagine um monitoramento constante da saúde das plantas, do solo e do clima, tudo a um clique de distância!	Refere-se ao **uso de tecnologias digitais**, como sensores, dispositivos móveis, internet das coisas (IoT), análise de dados e outras ferramentas digitais para otimizar e melhorar as práticas agrícolas. Isso pode incluir o monitoramento remoto de cultivos, gestão de irrigação baseada em dados, aplicativos móveis para gerenciamento de fazendas, entre outras soluções digitais.
Agricultura 4.0	
A agricultura 4.0 se aprofunda na convergência de tecnologias inovadoras, como: **• Inteligência artificial (IA): algoritmos inteligentes para analisar dados e tomar decisões automatizadas, otimizando tarefas como irrigação, adubação e controle de pragas;** **• Robótica: máquinas autônomas para auxiliar em atividades repetitivas e perigosas, como colheita e pulverização, liberando mão de obra para tarefas mais estratégicas;** **• Drones: olhos no céu para monitorar a lavoura em tempo real, detectando áreas com problemas e mapeando a produtividade.**	Esse termo é uma **extensão da Revolução Industrial 4.0** aplicada à agricultura. Envolve a integração de tecnologias avançadas, como inteligência artificial (IA), big data, automação, robótica, drones e nanotecnologia, para aumentar a eficiência, produtividade e sustentabilidade da agricultura. A agricultura 4.0 visa criar sistemas agrícolas mais inteligentes, conectados e autônomos.
Agricultura 5.0	
A agricultura 5.0, ainda em seus primórdios, eleva a agricultura 4.0 a um novo patamar, integrando a produção com: **• Biotecnologia: avanços na manipulação genética para desenvolver culturas mais resistentes a pragas, doenças e condições climáticas adversas, otimizando a produtividade e reduzindo o uso de insumos;** **• Economia circular: minimização do desperdício e reutilização de recursos na produção, como água e energia, promovendo um ciclo agrícola mais sustentável;** **• Agricultura regenerativa: práticas que visam restaurar a saúde do solo e aumentar a biodiversidade, garantindo a produtividade a longo prazo e a preservação do meio ambiente.**	Esse conceito ainda está em desenvolvimento e é uma evolução da agricultura 4.0. Enquanto a agricultura 4.0 se concentra principalmente na automação e digitalização, a agricultura 5.0 busca integrar de forma mais holística os **aspectos humanos e sociais** com as tecnologias digitais avançadas. Isso inclui maior ênfase na sustentabilidade, responsabilidade social, colaboração entre agricultores e comunidades locais, e uma abordagem mais centrada no ser humano para o desenvolvimento agrícola.
Agricultura inteligente	
A agricultura inteligente, também conhecida como *Smart Farming*, é a união da agricultura digital com a inteligência artificial, criando um sistema completo de gestão agrícola. Através da análise de dados em tempo real, essa abordagem permite: **• Tomada de decisões mais precisas e ágeis: ajustes na irrigação, adubação e controle de pragas são feitos de forma personalizada para cada área da lavoura, otimizando o uso de recursos e aumentando a produtividade;** **• Redução do impacto ambiental: a aplicação direcionada de insumos diminui o desperdício e o impacto ambiental da produção, promovendo a sustentabilidade;** **• Aumento da rentabilidade: a otimização da produção e a redução de custos garantem maior lucratividade para o agricultor.**	Refere-se ao **uso de tecnologias avançadas**, como IA, big data, sensores e automação, para tomar decisões mais inteligentes e eficientes na gestão agrícola. Isso inclui a análise de grandes volumes de dados para prever padrões climáticos, identificar pragas e doenças, otimizar o uso de insumos agrícolas e melhorar o manejo dos cultivos de forma geral.
Agricultura de precisão	
A agricultura de precisão se concentra no manejo da variabilidade espacial do solo, clima e produtividade dentro da propriedade. Através de ferramentas como GPS, sensores e mapeamento georreferenciado, o agricultor obtém informações detalhadas sobre cada área da lavoura, permitindo: **• Aplicação variável de insumos: a quantidade de adubo, água e defensivos agrícolas é ajustada de acordo com as necessidades específicas de cada área, otimizando o uso de recursos e reduzindo custos;** **• Monitoramento da saúde da lavoura: identificação precoce de problemas como pragas, doenças e deficiências nutricionais, possibilitando ações imediatas e direcionadas, minimizando perdas na produção;** **• Aumento da produtividade: o manejo preciso garante que cada planta receba o que precisa para se desenvolver da melhor forma, resultando em maior produtividade e qualidade da colheita.**	É uma abordagem que utiliza tecnologias de monitoramento e análise de dados para personalizar e otimizar as práticas agrícolas em pequenas áreas específicas dentro de um campo. Isso inclui o mapeamento detalhado das características do solo, monitoramento do crescimento das plantas, aplicação precisa de insumos agrícolas (como fertilizantes e pesticidas) e outras práticas que visam maximizar a produtividade e reduzir o desperdício. A agricultura de precisão permite uma gestão mais eficiente dos recursos e uma produção mais sustentável.

A AP, além de atuar na gestão da variabilidade temporal e espacial, acelerou o uso das ferramentas como GNSS, SIG, sensoriamento remoto e máquinas agrícolas programáveis, pelos campos da produção rural. Esses elementos presentes no campo viabilizam a construção de sistemas ciberfísicos, o que provavelmente ajudou a acelerar também a produção de trabalhos acadêmicos, notadamente após 2016, que aprimoraram e aprofundaram a temática da agricultura de precisão. Assim sendo, é possível afirmar que a agricultura de precisão é uma temática que não apenas precede a agricultura digital, mas uma das componentes habilitadoras dessa nova fase que a agricultura está construindo.

4 AGRICULTURA DE PRECISÃO: DESAFIOS SOB DIFERENTES ÓTICAS, DESDE A PESQUISA ATÉ OS PRODUTORES

O ciclo da agricultura de precisão, que pode ser considerado tradicional em sistemas de controle, consiste em três etapas: leitura, análise e atuação. A leitura é o que viabiliza a obtenção de dados temporais, espaciais e individuais de solo, ambiente, plantas e animais. Cada um dos dados para o uso em análise da gestão do sistema de produção rural deve estar associado ao local com as suas coordenadas geográficas e a data e horário em que foi obtido o valor. A análise, por sua vez, utiliza, além dos dados do sistema de produção, outras informações de forma combinada, como, por exemplo, informações de mercado, para apoiar uma decisão espacialmente variada e sustentável. Tendo uma recomendação técnica, a operação é programada para que a atuação no campo seja realizada, quer seja para aplicar um insumo ou executar uma ação nos locais conforme indicado.

Desde o início da agricultura de precisão houve uma produção significativa de conhecimentos e de aprendizados, mas há, ainda, muitos desafios formidáveis a serem vencidos. A gestão da variabilidade trouxe a oportunidade e o desafio de identificar a variabilidade espacial, suas causas e criar as recomendações técnicas de acordo com a aptidão local para uma cultura ou mais culturas. Refinar as recomendações técnicas inicialmente criadas regionalmente trouxe enorme oportunidade para renovar agendas de pesquisas no âmbito agronômico. Na formação de novos profissionais para atuar no sistema de produção agrícola, a base conceitual de geoestatística e SIG tem se fortalecido, além das demais disciplinas que rementem à integração de tecnologias multidisciplinares.

Cherubin et al. (2022) levantaram a trajetória de 25 anos da pesquisa científica brasileira e apontaram áreas-chave que permanecem inexploradas e que, segundo os autores, devem ser incentivadas em pesquisas futuras: (a.i) o desenvolvimento de ferramentas de tomadas de decisão baseadas em digital, que são fundamentadas pela construção sistematizada de grandes bancos de dados contendo informações espaciais e temporais de alta qualidade, usando múltiplas ferramentas de monitoramento (por exemplo, sensoriamento de solo/plantas e previsão do tempo), informações de gerenciamento e histórico do campo e respostas de rendimento à aplicação de insumos por meio de experimentação de precisão na fazenda (*on-farm*); (a.ii) ampliação da experimentação de precisão na fazenda usando protocolos bem estabelecidos dentro de uma rede abrangente de pesquisa; (a.iii) integração entre abordagens de aprendizado de máquina inovadoras e grandes bancos de dados para promover a implementação de sistemas de suporte à decisão baseados em digital; e (a.iv) aplicações de agricultura de precisão para questões ambientais (por exemplo, sequestro de carbono e redução do uso de agroquímicos). Essas áreas apontam para novas perspectivas de avanço da ciência na agricultura.

Sob o aspecto da política, a Lei nº 14.475, de 13 de dezembro de 2022, instituiu a Política Nacional de Incentivo à Agricultura e Pecuária de Precisão, com o objetivo de ampliar a utilização de técnicas de produção agropecuária no Brasil. Essa lei, de

2014, foi um passo importante da Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão na Agenda Estratégica 2014-2025[8].

Do ponto de vista da "percepção" da mídia digital, em relação aos principais desafios da agricultura de precisão, o ChatGPT (consulta realizada em 27 de abril de 2024) aponta os seguintes tópicos: (b.i) custo inicial elevado; (b.ii) acesso à tecnologia; (b.iii) capacitação e educação; (b.iv) adaptação a diferentes realidades regionais; (b.v) integração de dados; (b.vi) manutenção e suporte técnico; (b.vii) aspectos regulatórios e de privacidade. Por meio do Gemini (consulta em 27 de abril de 2024): (c.i) alto custo de implementação; (c.ii) falta de mão de obra qualificada; (c.iii) dificuldade de acesso à internet; (c.iv) incompatibilidade entre equipamentos; (c.v) desconhecimento dos benefícios; (c.vi) complexidade da análise de dados; (c.vii) questões de segurança da informação; (c.viii) adaptação às características regionais; (c.ix) integração com outras práticas agrícolas; (c.x) mudanças na cultura organizacional. Esses tópicos indicam o desafio e a dificuldade dos produtores rurais em adotar a agricultura de precisão. Isso indica que as ferramentas tecnológicas (algumas) não são ainda simples o suficiente para serem adotadas.

Atualmente, há informações, imagens de satélite, diversos aplicativos e softwares que podem ser utilizados para a agricultura de precisão, que estão disponíveis no mercado, alguns até de forma gratuita. Componentes que eram considerados caros como, *chip*s receptores GNSS e demais eletrônicos, estão disponíveis com custo compatível para ser embarcado em dispositivos pessoais. Porém, muitos dos sistemas dedicados à agricultura ainda não estão integrados e seus custo ainda são elevados. A maioria das máquinas, equipamentos, softwares e aplicativos utilizados na agricultura de precisão é de uma geração que exige habilidades em lidar com diferentes padrões, diversos recursos e comandos proprietários. Nesse nível tecnológico, é requerido que o operador seja treinado cada um com um sistema distinto. Apesar de gratuito, o QGIS, que é um projeto de SIG oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo) e de uso gratuito, exige domínio e formação especializada com horas de treinamento, o que pode impactar em custos, principalmente aos pequenos e médios produtores. Os usuários, produtores rurais devem elaborar um plano de investimento. Devem estudar se a sua lavoura ou plantel possui variabilidade suficiente para projetar expectativa de retorno econômico. Se não houver variabilidade suficiente, o retorno não será adequado para um sistema de aplicação à taxa variada, por exemplo. Para realizar esse estudo, o produtor rural deve contar com treinamento. Nesse ponto, faz sentido indicar que o (b.i) custo inicial elevado e o (c.i) alto custo de implementação podem ser desafiadores para o produtor e indiretamente para revenda, por não ter parâmetros de retorno econômico antes da aquisição. Não tendo esses parâmetros, os equipamentos, sem dúvida, são de custo elevado.

A ausência de conhecimento básico torna a adoção muito mais desafiadora. Nesse sentido, o (b.ii) acesso à tecnologia, (b.iii) capacitação e educação, (b.iv) adaptação a diferentes realidades regionais, (b.v) integração de dados, (b.vi) manutenção e suporte técnico, (c.ii) falta de mão de obra qualificada, (c.v) desconhecimento dos benefícios, (c.vi) complexidade da análise de dados e (c.x) mudanças na cultura organizacional são itens críticos e diretamente ligados ao nível de preparo técnico da equipe para a implementação adequada da AP.

Particularmente, aos produtores de pequeno e médio porte, devido em boa parte ao nível tecnológico atual empregado, as máquinas, equipamentos e softwares são um dos maiores desafios, pois muitos não têm condição de contar com uma

[8] Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/tecnologia-agropecuaria/agricultura-de-precisao-1/arquivos-de-agricultura-de-precisao/agenda-estrategica-do-setor-de-agricultura-de-precisao.pdf/view. Acesso em: 24 jan. 2024.

equipe de apoio em TI. Talvez, no futuro, seja possível desenvolver equipamentos considerados colaborativos, que sejam capazes de conversar por IA e realizar operações e análises importantes para a AP.

Porém, antes da presença da IA, em apoio às operações de AP, desafios anteriores, como integração de dados, aspectos regulatórios e de privacidade, dificuldade de acesso à internet, incompatibilidade entre equipamentos e questões de segurança da informação, deverão ser superados.

5 A AGRICULTURA DE PRECISÃO NA ERA DIGITAL

Ao longo deste capítulo, foram apresentados o contexto da era digital e seus potenciais para acomodar este terceiro livro nesse ecossistema. A transformação da sociedade traz perspectivas de mudança cultural e invenções de modelos de negócio que mudam a relação da economia tradicional. Modelos de cadeias que fizeram da nossa agricultura um sucesso podem ou devem ser alterados em alguns aspectos essenciais que impedem avanços. Se um dos maiores motivos de sucesso da nossa agricultura é a disponibilidade e a redução do custo de alimentos, esse mesmo sucesso trouxe, também, pressão aos produtores. As agritechs que atuam com os pequenos e médios produtores trazem a possibilidade de apoiar a agregação de valor, encurtando cadeias e inserindo valor das informações aos produtos. Para isso, dados são essenciais. A agricultura de precisão, ao gerar dados, pode apoiar a construção de informações necessárias para uma agricultura sustentável e transparente, sintonizada com a demanda do consumidor. A agricultura de precisão é assim uma habilitadora para a próxima agricultura.

O próximo e, provavelmente, o maior desafio da sociedade em relação à temática é ampliar a adoção da AP para que o campo, além de produzir dados para alimentar processo de gestão da produção eficiente, proveja dados para que as cadeias de valores possam ser abastecidas de informações de boa qualidade.

No primeiro momento, a ampliação da adoção remete aos processos de disseminação e treinamento. Grupos de estudos que têm atuado em Comissões ordinárias como a CBAPD indicam a existência de um número ainda muito reduzido e insuficientes de disciplinas dentro de cursos tradicionais como Agronomia, Engenharia Agronômica, Engenharia Agrícola, Zootecnia, entre outros, para que ocorra a disseminação e o uso da agricultura de precisão de forma suficiente para gerar uma transformação segura e virtuosa. Estrutura de cursos e ementas deve ainda ser construída em abrangência nacional e, para que ocorra de forma eficaz, a academia deve ainda contar com esforço multisetorial, com contribuições principalmente das agritechs e seu ecossistema.

No passado não muito remoto, foi possível acompanhar o desenvolvimento de equipamentos e sistemas com interfaces complexas possíveis de serem acessados apenas por letrados digitais. Atualmente, essas interfaces, como as de automação e controles residencial, estão possíveis de serem ativados por comando de voz com interpretação inteligente. Não são apenas interfaces, mas existem ajustes, calibrações e processos que se a propriedade rural não tiver uma equipe muito bem sintonizada, a retirada de dados das máquinas e o seu uso tornam-se desafiadores a ponto de muitos agricultores abandonarem os processos. Desse modo, os equipamentos e sistemas agrícolas que apoiam a agricultura de precisão deverão necessariamente amadurecer para alcançar produtores rurais e operadores por meio de uma linguagem mais adequada às suas experiências. Outra frente importante é a viabilização de acesso a dados, e isso passa também pela padronização, segurança e acessibilidade dos dados. Essa melhoria tecnológica pode reduzir a necessidade de treinamentos formais de alto custo e possibilitar uma disponibilidade maior de operadores capacitados e viabilizá-los a realizar uma agricultura sustentável apoiada em dados.

Posto isso, para ampliar a adoção, há necessidade de métodos de análise, que ainda são objetos de estudos e de desenvolvimento. Técnicas de experimentação *on-farm* vêm possibilitando viabilizar a obtenção de informações específicas dos talhões, com uso de equipamentos já utilizados pela AP nas propriedades rurais, além de indicadores que possibilitam o manejo específico e maior sustentabilidade das propriedades rurais. Nesse novo passo da agricultura de precisão, há um avanço consistente na pecuária. Os meios que têm sido utilizados para identificar bovinos são brincos e RFID (*Radio Frequency Identification*). Avanços em uma eletrônica mais elaborada para reconhecimento da localização e movimento em colares ou implantes estão avançando. Mais recentemente, o uso de câmeras tem aumentado para analisar movimentos e por meio delas obter informações da saúde do animal para apoiar na gestão do manejo. Sistema de ordenha robotizada utiliza esses sistemas de reconhecimento baseado em imagens. Há esforços para uso de imagens para reconhecimento do animal, assim como acontece com o processo de biometria em humanos. Essas ferramentas para a pecuária são fundamentais para a sua digitalização, de forma semelhante ao que os receptores GNSS entregaram para a lavoura. Talvez essa seja a tecnologia que falta à pecuária para abrir oportunidade ao setor embarcar definitivamente na "pecuária de precisão".

Assim, abrem-se novas oportunidades à agricultura de precisão nessa nova organização da sociedade que está por vir. No momento, a agricultura de precisão pode ser considerada, não como uma fase precedente da agricultura digital, mas como sua habilitadora.

REFERÊNCIAS

BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V., BASSOI, L. H., INAMASU, R. Y. **Agricultura de Precisão:** resultados de um Novo Olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 596 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e de Abastecimento. Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Sustentável e Irrigação. **Potencialidades e Desafios do agro 4.0 (MAPA/MCTI)**: gt iii "cadeias produtivas e desenvolvimento de fornecedores" câmara do agro 4.0. Brasília, DF, 2021. 66 p.

CHERUBIN, M. R.; DAMIAN, J. M.; TAVARES, T. R.; TREVISAN, R. G.; COLAÇO, A. F.; EITELWEIN, M. T.; MARTELLO, M.; INAMASU, R. Y.; PIAS, O. H. D. C.; MOLIN, J. P. Precision Agriculture in Brazil: the trajectory of 25 years of scientific research. **Agriculture**, v 12., n. 11, p. 1882, 2022. DOI: http://doi.org/10.3390/agriculture12111882.

DIAS, E. M.; DOURADO NETO, D.; SCOTON, M. L. R. P. D; OLIVEIRA, D. H. S.; SANTOS, I. M. G. L.; MENEZES, J. H. V. **Agro 4.0**: fundamentos, realidades e perspectivas para o Brasil. Rio de Janeiro: Autografia, 2023. 306 p.

DÖRR, J.; NACHTMANN, M. **Handbook Digital Farming**: digital transformation for sustainable agriculture. Berlin: Springer, 2022. 833 p.

EVANS, C. J. Precision engineering: an evolutionary perspective. **Philosophical Transactions of the Royal Society A:** Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 370, p. 3835-3851, 2012. DOI: http://doi.org/10.1098/rsta.2011.0050.

FERRAZ, M. N. Agricultura de precisão e agricultura digital na prática: os benefícios das tecnologias digitais para o agronegócio. In: DIAS, E. M.; DOURADO NETO, D.; SCOTON, M. L. R. P. D; OLIVEIRA, D. H. S.; SANTOS, I. M. G. L.; MENEZES, J. H. V. (eds.). **Agro 4.0**: fundamentos, realidades e perspectivas para o Brasil. Rio de Janeiro: Autografia, 2023. 306 p.

INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. **Agricultura de Precisão:** um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. 334 p.

KAGERMANN, H.; HELBIG, J.; WAHLSTER, W. **Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0:** Securing the Future of German Manufacturing Industry; Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. 2013. Disponível em: https://www.acatech.de/publikation/umsetzungsempfehlungen-fuer-das-zukunfts-

projekt-industrie-4-0-abschlussbericht-des-arbeitskreises-industrie-4-0/download--pdf?lang=wildcard. Acesso em: 12 jan. 2024.

LASI, H.; FETTKE, P.; KEMPER, H. G.; FELD, T.; HOFFMANN, M. Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, v. 6, n. 4, p. 239-242, 2014. DOI: http://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4.

LEACH, R.; SMITH, S. T. **Basics of precision engineering**. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2018. 659 p.

LEITE, R. A.; BORÉM, A.; BORGES JÚNIOR, A. **Agricultura 5.0**. Arinos, MG: Produção Independente, 2023. 306 p.

LINSLEY, C. M.; BAUER, F. C. **Test your soil for acidity.** Illinois: College of Agriculture and Agricultural Experiment Station, Univesity of Illinois, 1929. 16 p. (Circular n. 346).

MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A. ; BOLFE, É. L. (ed.). **Agricultura Digital**: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF: Embrapa, 2020. 406 p.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Precision Agriculture in the 21st Century**: geospatial and information technologies in crop management. Washington, DC: The National Academies Press, 1997. 168 p.

QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M.; PINTO, F. de A. C.; BORÉM, A. **Agricultura Digital**. Viçosa: Produção Independente, 2020. 350 p.

SAE BRASIL-KPMG, Pesquisa SAE BRASIL, **Caminhos da Tecnologia no Agronegócio: Oportunidades, desafios e perspectivas,** 2024, 1a Edição. Disponível em: https://pages.saebrasil.org.br/relatorio-pesquisa-caminhos-da-tecnologia-no-agronegocio. Acesso em: 20 fev. 2023.

SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial**. São Paulo: Edipro, 2018. 160 p.

SCHWAB, K.; DAVIS, N. **Aplicando a quarta revolução industrial**. São Paulo: Edipro, 2018. 352 p.

SPERINGER, M.; SCHNELZER, J. **Differentiation of Industry 4.0 Models**: the 4th industrial revolution from different regional perspectives in the global north and global south. Vienna: Regional Academy on the United Nations, 2019. Disponível em: http://www.ra-un.org/publications. DOI: https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35510.55363.

WORLD ECONOMIC FORUM. **Global Risks Report 2024**. 2024. Disponível em: https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2024/. Acesso em: 20 fev. 2023.

Sumário

SEÇÃO 1 - TECNOLOGIAS

1 Experimentação on-farm no âmbito da agricultura de precisão 38

João Leonardo Fernandes Pires, Ziany Neiva Brandão, Álvaro Vilela de Resende, Célia Regina Grego, Edison Ulisses Ramos Junior, Carlos Manoel Pedro Vaz, Julio Cezar Franchini dos Santos, Ronaldo Pereira de Oliveira, Christian Bredemeier, André Luis Vian, Carolina Trentin

2 Inteligência artificial e ciência de dados para o desenvolvimento da agricultura inteligente 44

Ednaldo José Ferreira, Alexandre Cláudio Botazzo Delbem, Alex Bisetto Bertolla, Marcos Cezar Visoli, Cassio Antônio Andrade, Suzana Lucy Nixdorf, Edilene Cristina Ferreira

3 Inteligência artificial aplicada na agricultura de precisão e digital 52

Lucio André de Castro Jorge, Lucas Prado Osco, José Marcato Júnior, Ana Paula Marques Ramos, Wesley Nunes Gonçalves, Eduardo Antonio Speranza, Carlos Manoel Pedro Vaz, Ricardo Yassushi Inamasu

4 A agricultura de precisão, a engenharia de precisão e a eletrônica embarcada ... 65

Ricardo Yassushi Inamasu, Rafael Vieira de Sousa

5 Alinhamento das tecnologias de automação, agricultura de precisão e digital aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis 75

Alberto Carlos de Campos Bernardi, Evandro Chartuni Mantovani, Paulo Sergio de Paula Herrmann Junior, Maria Angelica de Andrade Leite, Breno Silva Beda de Assunção, Ricardo Yassushi Inamasu, Ricardo Fonseca Araujo, Margareth Gonçalves Simões, Ronaldo Pereira de Oliveira, Thiago Teixeira Santos

6 Fenotipagem de plantas de alto rendimento, genotipagem, agricultura de precisão e agricultura digital para uma agricultura sustentável e produtiva 88

Paulo Sergio de Paula Herrmann Junior, Alberto Carlos de Campos Bernardi, Breno Silva Beda de Assunção, Carlos Manoel Pedro Vaz, Evandro Chartuni Mantovani, Juliana Erika de Carvalho Teixeira Yassitepe, Margareth Gonçalves Simões, Maria Angelica de Andrade Leite, Maria Lucrecia Gerosa Ramos, Ricardo Yassushi Inamasu, Ricardo Fonseca Araujo, Ronaldo Pereira de Oliveira, Thiago Teixeira Santos, Walter Quadros Ribeiro Junior

7 Mirã 2.0 – Plataforma Robótica Agrícola para monitoramento das condições do solo em culturas de soja no Brasil 97

Andres Eduardo Baquero Velasquez, Vitor Akihiro Hisano Higuti, Mateus Valverde Gasparino, Leonardo Bonacini, Daniel Varela Magalhães, Marcelo Becker, Débora Marcondes Bastos Pereira Milori

8 Desenvolvimento de sistema embarcado de coleta de dados para geração de mapas de produtividade 107

Paula Leticia Souza de Moura, Leticia dos Santos, Glaucio José Gomes, Luciano Gebler, Ricardo Sobjak, Paulo Cesar Tonin, Kelyn Schenatto, Claudio Leones Bazzi

9 Controladores e algoritmos computacionais embarcados para agregação de qualidade no uso de pulverizadores terrestres em aplicação localizada 115

Heitor Vinicius Mercaldi, Deniver Reinke Schutz, Elmer Alexis Gamboa Peñaloza, Vilma Alves de Oliveira, Paulo Estevão Cruvinel

10 Detecção de frutos por imagem com redes neurais convolutivas: um tutorial ...129

Thiago Teixeira Santos

11 Desenvolvimento de armadilha eletrônica para o monitoramento da mosca-das-frutas sul-americana 138
Frederico Victor Dos Santos Silva, Glaucio José Gomes, Luciano Gebler, Regis Sivori Silva dos Santos, Ricardo Sobjak, Paulo Cesar Tonin, Kelyn Schenatto, Claudio Leones Bazzi, Pedro Luiz de Paula Filho

12 Um exemplo de aplicação da filosofia "Faça Você Mesmo" para suprir a falta de instrumentação na fruticultura de precisão: construção de estação meteorológica de baixo custo 147
Luciano Gebler, Mirabor José Leite Júnior, Lucas de Ross Marchioretto

13 Planejamento e avaliação de sistemas de terraceamento utilizando imagens aéreas e ferramentas digitais 159
Julio Cezar Franchini dos Santos, Esmael Lopes dos Santos, Henrique Debiasi, Rafael Herrig Furlanetto, Anderson Sartori, Tiago Cyrino Carrashi, Alvadi Antonio Balbinot Junior

14 Correlação espacial em escala de campo entre atributos de Latossolos e espectros Vis-NIR 166
José Francirlei de Oliveira, Robélio Leandro Marchão, Michel Brossard, Edemar Joaquim Corazza, Pedro Rodolfo Siqueira Vendrame Maria de Fátima Guimarães

15 Variáveis radiométricas de solos podem reduzir custos para a implementação da agricultura de precisão? 172
Rogério Costa Campos, Gean Nascimento Rocha, José Alexandre Melo Demattê

16 Técnicas de agricultura de precisão na obtenção de dados altimétricos para planejamento do solo e da água 178
Antônio Luis Santi, Ropson Delavi Jendrzikowski, Filipe Belchor Barcelos, Luiz Fernando Pezzini Ribas, Ezequiel Zibetti Fornari, Caroline Montanari Giraldi, Luís Felipe Rossetto Gerlach

17 Zoneamentos edafoclimáticos em agricultura de precisão 185
José Maria Filippini-Alba

18 Mapeamento digital de solos e a agricultura de precisão 193
Stefan Domingues Nachtigall, Pablo Miguel, Jéferson Diego Leidemer, José Maria Filippini-Alba

19 Espectrorradiometria em agricultura de precisão nas terras baixas do Rio Grande do Sul 200
José Maria Filippini-Alba, Pablo Miguel, Mélory Maria Fernandes de Araujo

20 ORBIO: Uma aplicação web para controle biológico com veículos aéreos não tripulados 209
Bruno Siqueira da Silva, Tauã Milech Cabreira, Bruno José Olivieri de Souza, Nicholas Matias, Ricardo Antônio de Oliveira Machado, Lucio André de Castro Jorge, Paulo Roberto Ferreira Junior

21 Avaliação da fertilidade de solos usando a espectroscopia de emissão óptica com plasma induzido por laser 222
Vinícius Câmara Costa, Alfredo Augusto Pereira Xavier, Kleydson Stênio Gaioso da Silva, Amanda Vieira Ribeiro, Mauro Henrique de Lima Filho, Guilherme Amorim Ventriche Favero da Silva, Paulino Ribeiro Villas-Boas, Ladislau Martin Neto, Aida Bebeachibuli Magalhães, Débora Marcondes Bastos Pereira Milori

22 Avaliação do modelo plano 3D para determinação de carbono em solos brasileiros utilizando um sistema LIBS automatizado para análise comercial em larga escala 229
Kleydson Stênio Gaioso da Silva, Amanda Vieira Ribeiro, Vinícius Câmara Costa, Alfredo Augusto Pereira Xavier, Mauro Henrique de Lima Filho, Paulino Ribeiro Villas-Boas, Ladislau Martin Neto, Aida Bebeachibuli Magalhães, Débora Marcondes Bastos Pereira Milori

23 Quantificação nutricional foliar usando a espectroscopia de emissão de plasma induzido por laser 234
Luís Carlos Leva Borduchi, Débora Marcondes Bastos Pereira Milori, Maurício Conrado Meyer, Paulino Ribeiro Villas-Boas

24 Predição espacial do teor de matéria orgânica e argila do solo em vinhedos por espectroscopia Vis-NIR-SWIR 239
Daniely Vaz da Silva-Sangoi, Jean Michel Moura-Bueno, Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Luciano Gebler

25 Uso da espectroscopia de infravermelho próximo para estimar o teor de nitrogênio foliar na cultura do milho 248
Diego Lima Lucchesi, Gabriela Naibo, Alexandre Alan Cassinelli, Gabriel Augusto Engel, André Luis Vian, Christian Bredemeier, Tales Tiecher

26 Poda mecanizada na macieira e seus efeitos no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) 255
Victória Reis Bortoluz, Bruno Tadashi Chiba da Silva, André Luis Vian, Gabriel Marson, Anna Elisa Petersen Gatelli, Gilmar Arduino Bettio Marodin, Fernando José Hawerroth, Leandro Bortoluz, Christian Bredemeier

27 Caracterização de doenças fúngicas de Vitis vinifera por radiometria espectral 260
Pâmela Aude Pithan, Jorge Ricardo Ducati, Lucas da Ressurreição Garrido, Diniz Carvalho de Arruda, Rosemary Hoff, Adriane Brill Thum

28 Calibração de condutivímetro de solo para zoneamento de disponibilidade de água em Latossolo Bruno 272
Luciano Gebler, David José Miquelutti, Josieli Aparecida Fortuna, Mateus Foscarin Montanari, Diego Silva Fortuna, Rodrigo Moreira Hoffmann

29 Utilização do nariz eletrônico para o monitoramento de gases emitidos por plantas de soja sob estresse hídrico 280
Paulo Sergio de Paula Herrmann Junior, Matheus Santos Luccas, Ednaldo José Ferreira, André Torre-Neto

SEÇÃO 2 - CULTURAS ANUAIS

30 Variabilidade dos solos usando técnicas geoespaciais e machine learning para monitoramento nutricional e estimativa da produtividade do algodoeiro 290
Ziany Neiva Brandão, Hugo Machado Rodrigues, Ronaldo Pereira de Oliveira, Everaldo Paulo Medeiros, Franciele Morlin Carneiro, Luciano Shozo Shiratsuchi

31 Variabilidade espacial de fatores que afetam a produtividade de milho-soja no Cerrado 297
Marina de Fátima Vilela, Luciano Shozo Shiratsuchi, Sandro Manuel Carmelino Hurtado, Edemar Joaquim Corazza, Juaci Vitória Malaquias

32 Variabilidade espacial de rendimento de grãos e qualidade fisiológica de semente de soja e sua relação com atributos químicos do solo 307
Antônio Luis Santi, Carolina Previati, Ezequiel Zibetti Fornari, Caroline Montanari Giraldi, Luís Felipe Rossetto Gerlach, Diones Thiesen Hüther, Bernardo Limberger Pertile

33 Variabilidade espacial de nematoides, de parâmetros do solo e da produtividade da soja e algodão no Mato Grosso 314
Julio Cezar Franchini dos Santos, Rafael Galbieri, Carlos Manoel Pedro Vaz, Eduardo Antonio Speranza, Ricardo Yassushi Inamasu, Ladislau Marcelino Rabello, Henrique Debiasi, Pedro Oliveira Mokfa, Ivani de Oliveira Negrão Lopes, Maria Cristina Neves de Oliveira, Márcio de Souza, Amandio Pires Junior

34 Variabilidade espacial da atividade micorrízica e sua influência na disponibilidade de fósforo e no rendimento de grãos do milho 324
Antônio Luis Santi, Larissa Lamperti Tonello, Maurício Piccoli Bonatti, Eduarda Brizolla, Ezequiel Zibetti Fornari, Caroline Montanari Giraldi, Luís Felipe Rossetto Gerlach

35 Seleção de bandas espectrais e índices de vegetação para identificação de déficit nutricional em cultivos de algodão e milho 331
Ziany Neiva Brandão, Álvaro Vilela de Resende, Célia Regina Grego, Jeferson Giehl, Luciano Shozo Shiratsuchi

36 Ferramentas para monitoramento do vazio sanitário da soja por imagens multiespectrais orbitais 338
Jean-Jacques Georges Soares de Groote, Lucas Prado Osco, Alessandro da Silva Oliveira, Lucio André de Castro Jorge

37 Análise e sugestão de abordagem para filtragem de mapas de produtividade para a cultura do algodão 346
Eduardo Antonio Speranza, Carlos Manoel Pedro Vaz, Julio Cezar Franchini dos Santos, Ricardo Yassushi Inamasu, Ivani de Oliveira Negrão Lopes, Ladislau Marcelino Rabello

38 Utilização de NDVI para delimitação de Zonas de Manejo e ajuste na população de plantas 355
Antônio Luis Santi, João Pedro Cunha Arruda, Ezequiel Zibetti Fornari, Caroline Montanari Giraldi, Luís Felipe Rossetto Gerlach, Luiz Henrique Baptista Velho, Maurício Guilherme Stein Vian, Aline Linhares do Amaral

39 Definição de zonas de manejo em área de produção de milho 2ª safra na região norte do Paraná 360
Julio Cezar Franchini dos Santos, Henrique Debiasi, Ivani de Oliveira Negrão Lopes, Carlos Manoel Pedro Vaz, Eduardo Antonio Speranza, Alvadi Antônio Balbinot Junior

40 Delineamento de potenciais zonas de manejo para intervenções espacialmente diferenciadas para as culturas de algodão, soja e milho 368
Eduardo Antonio Speranza, Ivani de Oliveira Negrão Lopes, Carlos Manoel Pedro Vaz, Julio Cezar Franchini dos Santos, Ricardo Yassushi Inamasu, Ladislau Marcelino Rabello, Lucio André de Castro Jorge

41 Desenvolvimento de modelos para estimativa da produtividade do algodoeiro no estado de Mato Grosso utilizando dados dos satélites EOS Modis 376
Carlos Manoel Pedro Vaz, Flavio Santos da Silva, Daniel Alexandre Botta de Siqueira, Eduardo Antonio Speranza, Ednaldo José Ferreira, Julio Cezar Franchini dos Santos, Márcio de Souza, Rafael Galbieri, Jean Louis Belot

42 Modelo para indicação de adubação nitrogenada em cobertura na cultura do milho utilizando sensor de vegetação 388
André Luis Vian, Christian Bredemeier, Maicon Andreo Drum, Isabela Seffrin Rodrigues, Thaís Martins Mariano, Elisa Maria Befert

43 Modelo para indicação de adubação nitrogenada em cobertura na cultura do trigo utilizando sensor de vegetação 394
André Luis Vian, Christian Bredemeier, João Leonardo Fernandes Pires, Carolina Trentin, Maicon Andreo Drum, Manuele Zeni, Marcos Caraffa, Franciane Lemes dos Santos, Alexandre Alan Cassinelli, Anelise Brun, Marcelo de Carli Toigo, Rogério Ferreira Aires

44 Manejo da fertilidade do solo para reduzir danos do nematoide Pratylenchus brachyurus em soja 403
Julio Cezar Franchini dos Santos, Henrique Debiasi, Edison Ulisses Ramos Junior, Alvadi Antônio Balbinot Junior, Valéria de Oliveira Faleiro, Laurimar Gonçalves Vendrúsculo

45 Variabilidade espacial da distribuição de fertilizantes de dosadores de rosca helicoidal por gravidade e por transbordo e sua influência na cultura da soja 412
David Peres da Rosa, Júlio Tagliari Balestrin, Roger Toscan Spagnolo

46 Experimentação on-farm com densidade de semeadura e nitrogênio na cultura do trigo: estudo de caso na Fazenda Butiá, Coxilha (RS) 421
João Leonardo Fernandes Pires, Carlos Goergen, Carlos Eduardo Buratto, Djone Fucks, Aldemir Pasinato, Jordano Bortoncello

47 Indicações metodológicas para a realização de ensaios on-farm no âmbito da Agricultura de Precisão 428
João Leonardo Fernandes Pires, Ziany Neiva Brandão, Álvaro Vilela de Resende, Célia Regina Grego, Edison Ulisses Ramos Junior, Carlos Manoel Pedro Vaz, Julio Cezar Franchini dos Santos, Ronaldo Pereira de Oliveira, Christian Bredemeier, André Luis Vian, Carolina Trentin

SEÇÃO 3 - CULTURAS PERENES

48 Implantação da agricultura de precisão para manejo diferenciado em sistema de produção de cafés especiais na região sul de Minas Gerais 442
Célia Regina Grego, Gustavo Costa Rodrigues, Cristina Aparecida Gonçalves Rodrigues, Eduardo Antonio Speranza, Ariovaldo Luchiari Júnior, Luciano Vieira Koenigkan, Carlos César Ronquim, Adauto Luiz Mancini, Débora Pignatari Drucker

49 Agricultura de precisão e experimentação on-farm na cana-de-açúcar e estudo de caso para validação das zonas diferenciadas de manejo numa área produtiva 449
Célia Regina Grego, Cristina Aparecida Gonçalves Rodrigues, Eduardo Antonio Speranza, Ariovaldo Luchiari Júnior, Carlos César Ronquim

50 Adoção de práticas e tecnologias de agricultura de precisão por produtores de cana-de-açúcar do estado de São Paulo 455
Carlos Ivan Mozambani, Hildo Meirelles de Souza Filho, Marcela de Mello Brandão Vinholis, Marcelo José Carrer

51 Sistema de informação geográfica para mapeamento da qualidade de maçã APPLESHOW 464
Luciano Gebler, Diego Rodrigo Longo, Claudio Leones Bazzi

52 Uso de espectrorradiometria para detecção de cancro europeu em macieira 471
Silvio André Meirelles Alves, Claudia Cardoso Nunes, Lúcio de Paula Amaral, Luciano Gebler

53 Sistema de coleta de imagens para previsão de produção em pomares de maçã ...476
Darlan Alaor Selzlein, Carlos Moyses Abrahão Auzi Ribeiro, Luciano Gebler, Pedro Luiz de Paula Filho

54 Uso do DA-Meter como método não destrutivo no monitoramento da maturação de maçãs 482
Lucimara Rogéria Antoniolli, Elenilson Godoy Alves Filho, Daniela Dal Bosco, Leo Rufato, Luciano Gebler

55 Reflectância de macieiras a pleno sol e sob dois tipos de tela antigranizo: considerações para o sensoriamento remoto proximal 488
Andrea De Rossi, Lúcio de Paula Amaral, Luciano Gebler

56 Algoritmo para a implantação de zonas de manejo em fruticultura de precisão na cultura da maçã 493
Luciano Gebler, Andrea De Rossi, Silvio André Meirelles Alves, Regis Sivori Silva dos Santos

57 Geração de zonas de manejo em pomares de macieiras com base em NDVI e produtividade 509
Luciano Gebler, Andrea De Rossi, Renata Bulling Magro, Eduardo Antonio Speranza, Marcio da Silva Santos, Jardel Talamini de Abreu

58 Uso de metadados para a geração de mapas de zona de manejo de pragas em pomar: um estudo de caso 518
Luciano Gebler, Eduardo Antonio Speranza, Célia Regina Grego

59 Revisão sobre modelagem da avaliação do rendimento considerando a influência da variabilidade temporal em espécies frutíferas perenes 526
Luciano Gebler, Renata Bulling Magro, Eduardo Antonio Speranza

60 Zonas homogêneas de atributos de solo e de planta na produção de uvas colhidas no inverno 532
Luís Henrique Bassoi, Henrique Oldoni, Bruno Ricardo Silva Costa, Thassio Monteiro Menezes da Silva, Larissa Godarelli Farinassi, Anderson de Jesus Pereira

61 Viticultura de precisão na produção de vinhos de colheita de inverno 543
Luís Henrique Bassoi, Henrique Oldoni, Bruno Ricardo Silva Costa, Thassio Monteiro Menezes da Silva, Larissa Godarelli Farinassi, Anderson de Jesus Pereira, Claudia Rita de Souza, Lucas Bueno do Amaral, Renata Vieira da Mota, Francisco Mickael de Medeiros Câmara, Angelica Bender

62 Viticultura de precisão e enologia de precisão: ferramentas e principais parâmetros para a produção de uvas, elaboração e valorização de vinhos com tipicidades distintas em cada "terroir" 554
Giuliano Elias Pereira, Henrique Pessoa dos Santos, George Wellington Bastos de Melo, Luciano Gebler, Flávio Bello Fialho, Celito Crivellaro Guerra, Mauro Celso Zanus, Juliane Barreto de Oliveira, Thor Vinicius Martins Fajardo, Lucas da Ressurreição Garrido, Marcos Botton e Rosemary Hoff

63 Proposição metodológica de amostragem e geração de grade para aplicação em fruticultura de precisão 569
Célia Regina Grego, Eduardo Antonio Speranza, Luciano Gebler

64 Mapas de NDVI para definição de unidades de manejo diferenciadas para a vitivinicultura 579
Júlia Faccin Faé, Luís Felipe Rossetto Gerlach, Alexandre Alan Cassinelli, Gabriel Rieder Marson, André Luis Vian, Antônio Luis Santi, Gilmar Arduino Bettio Marodin

65 Comparação entre imagens orbitais Sentinel-2 e Planet para caracterização espacial e temporal de vinhedo por NDVI 586
Henrique Pauletto, Amanda Heemann Junges, Rosemary Hoff, Rodrigo Alberti

66 Investigação dos teores de radioelementos (K, U e Th) e seu zoneamento no solo de vinhedos 596
Rodrigo Alberti, Rosemary Hoff, Ricardo da Cunha Lopes, Henrique Pauletto

67 Uso da fluorescência da clorofila como variável para avaliar a evolução das antocianinas em uvas da cultivar Merlot em diferentes solos 604
Giseli Rodrigues Crizel, César Luis Girardi, Carlos Alberto Flores, José Maria Filippini-Alba

68 Recomendações para viticultura de precisão no Rio Grande do Sul 612
José Maria Filippini-Alba, Carlos Alberto Flores

SEÇÃO 4 - PECUÁRIA

69 Tecnologias de pecuária de precisão para o manejo de pastagens e animais 623
Alberto Carlos de Campos Bernardi, Patrícia Menezes Santos, José Ricardo Macedo Pezzopane, Alexandre Rossetto Garcia, Waldomiro Barioni Júnior, Sérgio Raposo Medeiros, Sandra Aparecida Santos

70 Drones e Inteligência Artificial para o monitoramento de gado 636
Jayme Garcia Arnal Barbedo

71 Ciência de dados aplicada à pecuária de corte 647
Thaís Basso Amaral, Guilherme Jordão de Magalhães Rosa, Marcos Cezar Visoli, Fabio Martins Guerra Nunes Dias

72 Identificação eletrônica de animais por radiofrequência: trajetória para elaboração de normas brasileiras e internacionais 657
Waldomiro Barioni Júnior, Washington Luiz de Barros Melo, Marcela de Mello Brandão Vinholis, Leoni Leite, Adriana da Hora Santos, Carlos Gustavo de Camargo Ferraz Machado, Fabiana Cunha Viana Leonelli, Ricardo Rosendo de Castro, Luiz Henrique Witzler, Paulo Estevão Cruvinel

73 Experiência da Embrapa Pecuária Sudeste na identificação eletrônica de animais por rádio frequência 665
Waldomiro Barioni Júnior, Carlos Gustavo de Camargo Ferraz Machado, Nacir Paranhos, Hélio de Sena G. Omote, Edilson da Silva Guimarães, Alberto Carlos de Campos Bernardi, Marcela de Mello Brandão Vinholis, Felipe Tonato

74 Livestock IoT – LIoT: Ecossistema de software para pecuária 677
Jonas Gomes, José Maria N. David, Regina Braga, Valdemar Vicente Graciano Neto, Wneiton Luiz Gomes, Leonardo Gravina Fonseca, Bruno Carvalho, Wagner Arbex,

75 TouceiraTech: um protótipo de FMIS para Pecuária de Precisão 682
Ânderson Fischoeder Soares, Naylor Bastiani Perez, Leonardo Bidese de Pinho

76 Termografia infravermelha aplicada à pecuária de precisão 689
Alexandre Rossetto Garcia,, Andréa do Nascimento Barreto, Mariana Jucá Moraes, Gabriela Novais Azevedo, Lívia Ferreira Pinho, Giovanna Galhardo Ramos, Alda Juliana Castro de Sousa

77 Adubação à taxa variável e uso eficiente de nutrientes em pastagens 702
Alberto Carlos de Campos Bernardi

78 Sistemas automatizados de ordenha no Brasil: panorama e percepções 716
Jaciara Diavão, Abias Santos Silva, Rebeca Ribeiro Silvi, Vanessa Amorim Teixeira, Thierry Ribeiro Tomich, Claudio Antônio Versiani Paiva, Mariana Magalhães Campos, Fernanda Samarini Machado, Rafael Ehrich Pontes Ferreira, João Ricardo Rebouças Dórea, Luiz Gustavo Ribeiro Pereira

79 Adoção de tecnologias de precisão em fazendas leiteiras no Brasil 724
Abias Santos Silva, Jaciara Diavão, Rebeca Ribeiro Silvi, Vanessa Amorim Teixeira, Thierry Ribeiro Tomich, Claudio Antônio Versiani Paiva, Mariana Magalhães Campos, Fernanda Samarini Machado, Rafael Ehrich Pontes Ferreira, João Ricardo Rebouças Dórea, Luiz Gustavo Ribeiro Pereira

80 Adoção de tecnologias de pecuária de precisão – percepção dos produtores de leite no Brasil 730
Jaciara Diavão, Abias Santos Silva, Rebeca Ribeiro Silvi, Vanessa Amorim Teixeira, Thierry Ribeiro Tomich, Claudio Antônio Versiani Paiva, Mariana Magalhães Campos, Fernanda Samarini Machado, Rafael Ehrich Pontes Ferreira, João Ricardo Rebouças Dórea, Luiz Gustavo Ribeiro Pereira

81 Desafios e oportunidades para produção de leite em sistema de ordenha voluntária a pasto 736
Teresa Cristina Alves, André Luiz Monteiro Novo, Sophia Aparecida Morro Chamilete, Ketlin Paôla Breunig

SEÇÃO 5 - SISTEMAS INTEGRADOS

82 Utilização de índices de vegetação obtidos com sensores proximais para a estimativa da biomassa e do valor nutritivo de pastagens tropicais 751
Henrique Bauab Brunetti, Cristiam Bosi, José Ricardo Macedo Pezzopane, Alberto Carlos de Campos Bernardi, Patrícia Menezes Santos

83 Variabilidade espaçotemporal da transmissão da radiação fotossinteticamente ativa em sistema silvipastoril 758
José Ricardo Macedo Pezzopane, Isabela Pedrino Maiello, Nicolle Laurenti, Giovana Maranhão Bettiol, Cristiam Bosi, Henrique Bauab Brunetti, Alexandre Rossetto Garcia, Alberto Carlos de Campos Bernardi

84 Variabilidade espacial de atributos do solo e da vegetação em sistemas integrados de produção 762
Nicolle Laurenti, Josiane Rodrigues, Edilson da Silva Guimarães, José Ricardo Macedo Pezzopane, Alberto Carlos de Campos Bernardi

85 Imagens obtidas por drone para estimativas de diâmetro e altura de árvores em sistema integrado de produção agropecuária 773
José Otávio de Almeida Bueno, Silvio Crestana, Edilson da Silva Guimarães, José Ricardo Macedo Pezzopane, Vandoir Bourscheidt, Alberto Carlos de Campos Bernardi

86 Monitoramento em alta frequência do índice de vegetação de sistema integrado Lavoura-Pecuária 782
Marcos Corrêa Neves, Alfredo José Barreto Luiz, Naylor Bastiani Perez

87 Variabilidade espacial do crescimento do eucalipto em um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta parcialmente atingido por incêndio 789
Luana Selli, José Ricardo Macedo Pezzopane, Teresa Cristina Alves, Alberto Carlos de Campos Bernardi

88 Variabilidade espacial dos atributos químicos de Latossolos do Cerrado: efeito do enleiramento e queima da madeira após supressão da vegetação nativa 797
Diogo Néia Eberhardt, Robélio Leandro Marchão, Pedro Rodolfo Siqueira Vendrame, Marc Corbeels, Osvaldo Guedes Filho, Eric Scopel, Thierry Becquer

Seção 1

Tecnologias

DSC00858.JPG - Fotos

Seção Tecnologias

Novos sensores, equipamentos e métodos de análise, automação, robótica, ciência de dados, inteligência artificial, sensoriamento remoto e outras tecnologias avançadas da era digital são fundamentais para o avanço da agricultura de precisão (AP), pois contribuem para viabilizar a caracterização da variabilidade espaço-temporal dos sistemas de produção e a otimização na aplicação dos insumos para o aumento da produtividade e redução do impacto ambiental.

Esta seção apresenta um conjunto de 29 capítulos com ênfase no desenvolvimento, aplicação e discussão de tecnologias habilitadoras da AP.

Os seis primeiros capítulos abordam textos de revisão, conceituação e perspectivas sobre temas centrais e estruturantes da AP na era digital. Isso inclui a aplicação da ciência de dados e da inteligência artificial, a engenharia de precisão e eletrônica embarcada, oportunidades e desafios da experimentação *on-farm*, a integração da AP com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), e a fenotipagem de plantas de alto desempenho.

Um segundo conjunto, com seis capítulos, descreve estudos em tecnologias de robótica, instrumentação, automação e processamento de imagens. Essas tecnologias visam o mapeamento do solo por meio de um robô agrícola em áreas de cultivo de soja, a coleta de dados para o mapeamento da produtividade de pomares de maçã, a aplicação localizada de agrotóxicos, detecção e contagem de maçãs e uvas no campo através de imagens, armadilha eletrônica para mosca das frutas e a construção de estação meteorológica de baixo custo.

O terceiro bloco, de oito capítulos, apresenta metodologias para o mapeamento da variabilidade espacial e temporal utilizando diferentes abordagens, como o mapeamento digital, o zoneamento edafoclimático, a utilização de sensoriamento remoto por satélites, drones, sensores proximais e GNSS. Essas técnicas são aplicadas na definição de zonas de manejo, implantação da AP, planejamento do uso do solo, implantação de sistemas de terraceamento e a dispersão, por meio de drones, de inimigos naturais para o controle biológico.

Por fim, um último conjunto de nove capítulos apresenta diversas metodologias para análises e aplicações no mapeamento de parâmetros do solo e da planta, como espectroscopia de emissão de plasma induzido por laser (LIBS), espectrorradiometria, espectroscopia no infravermelho próximo e visível (Vis-NIR), sensor de voláteis (E-Nose) e condutividade elétrica aparente do solo.

Carlos Manoel Pedro Vaz
Lucio André de Castro Jorge
Ricardo Yassushi Inamasu

1

Experimentação *on-farm* no âmbito da agricultura de precisão

On-farm experimentation within the scope of precision agriculture

João Leonardo Fernandes Pires[1], Ziany Neiva Brandão[2], Álvaro Vilela de Resende[3], Célia Regina Grego[4], Edison Ulisses Ramos Junior[5], Carlos Manoel Pedro Vaz[6], Julio Cezar Franchini dos Santos[7], Ronaldo Pereira de Oliveira[8], Christian Bredemeier[9], André Luis Vian[10], Carolina Trentin[11]

[1] *Pesquisador, Embrapa Trigo, Passo Fundo (RS), Brasil, joao.pires@embrapa.br*
[2] *Analista, Embrapa Algodão, Campina Grande (PB), Brasil, ziany.brandao@embrapa.br*
[3] *Pesquisador, Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas (MG), Brasil, alvaro.resende@embrapa.br*
[4] *Pesquisadora, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, celia.grego@embrapa.br*
[5] *Pesquisador, Embrapa Soja/Agrosilvipastoril, Sinop (MT), Brasil, edison.ramos@embrapa.br*
[6] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, carlos.vaz@embrapa.br*
[7] *Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, julio.franchini@embrapa.br*
[8] *Pesquisador, Embrapa Solos, Rio de Janeiro (RJ), Brasil, ronaldo.oliveira@embrapa.br*
[9] *Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), Brasil, cbredemeier@gmail.com*
[10] *Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), Brasil, vian.agronomo@gmail.com*
[11] *Doutoranda, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo (RS), Brasil, carolinatrentin@live.com*

RESUMO

A realização de pesquisa na fazenda (*on-farm*) representa uma etapa importante do ciclo da agricultura de precisão (AP). Apesar de ensaios *on-farm* não serem novidade, o uso específico para AP é relativamente recente e encontra-se em desenvolvimento. Essa modalidade de pesquisa foi facilitada por ferramentas tecnológicas e estratégias de implantação, avaliação e interpretação que permitem gerar conhecimento específico para cada talhão/zona de manejo. Como é um processo que envolve muitos atores e encontra-se em diferentes níveis de entendimento e aplicação, apresenta espaço para melhorias. Para tanto, é necessário que sejam conhecidas as oportunidades e dificuldades/limitações para realização dos ensaios, tornando possível a indicação de princípios e indicadores metodológicos para as condições de cultivo brasileiras, nas suas mais diferentes regiões, culturas e sistemas de produção.

Palavras-chave: agricultura de precisão; rede; Embrapa.

ABSTRACT

Conducting on-farm research is an important step in the Precision Agriculture (PA) cycle. Although on-farm trials are not new, specific use for AP is relatively recent and still under development. Technological tools, in addition to implementation, evaluation and interpretation strategies, have facilitated this type of research, allowing the generation of specific knowledge for each area/management zone. However, as a process involving many actors and different fields of understanding and application potential for improvement remains. Therefore, it is necessary to understand the opportunities and difficulties/limitations for carrying out on-farm trials, to allow us to determine methodological principles and indicators for Brazilian agricultural conditions, including their diverse regions, crops and production systems.

Keywords: precision agriculture; network; Embrapa.

1 INTRODUÇÃO

A filosofia de manejo de culturas produzidas em larga escala, baseada nos preceitos da agricultura de precisão (AP), adota uma série de etapas dentro de um processo voltado à eficiência no uso de insumos, ao maior rendimento de grãos (e/ou biomassa/fibra), à redução de custos, ao aumento de rentabilidade e, consequentemente, à maior sustentabilidade dos diferentes sistemas de produção utilizados no Brasil. Uma etapa importante é a realização de pesquisa/validação de tecnologias (quer sejam produtos ou processos) no ambiente de produção, denominados de ensaios na fazenda (conhecidos pelo termo em inglês como ensaios

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000072

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

on-farm onde o produtor usuário da AP pode se tornar pesquisador/conhecedor das características de suas próprias áreas agrícolas. Segundo Kyveryga et al. (2015), ensaios *on-farm* são aqueles usualmente conduzidos por agricultores com auxílio de agrônomos locais, consultores ou outros especialistas em pesquisa *on-farm* da rede regional que atende a fazenda.

A realização de ensaios em áreas de produção comercial é uma prática antiga do ponto de vista do uso de metodologias convencionais de pesquisa. Por exemplo, áreas de produção são utilizadas para realização de ensaios de Valor de Cultivo e Uso (VCUs) para registro de cultivares das principais culturas. Em delineamento convencional (blocos ao acaso, por exemplo), com aleatorização e repetições, experimentos para representar a interação genótipo x ambiente de cada região de interesse são conduzidos, comprovando os méritos dos genótipos para definição de lançamento comercial como novas cultivares. Da mesma forma, são realizados estudos de novas tecnologias/práticas de manejo, como de inoculantes, fertilizantes, eficiência de máquinas e implementos, produtos utilizados na proteção de plantas, entre outros. O que norteia esse tipo de estudo, no entanto, é que o foco é na efetividade/validação da tecnologia em si e não na aplicação dela na área onde o estudo foi conduzido. Geralmente, utilizam-se parcelas de pequenas dimensões, sem considerar a variabilidade da área, ou utilizam-se metodologias similares às empregadas nas Estações Experimentais, para minimizar efeitos não controlados.

Uma das principais justificativas para a realização de ensaios *on-farm* é testar novas tecnologias nas condições da fazenda, ou seja, em "ambiente real". Algumas razões citadas para realizar ensaios *on-farm* e não nas estações experimentais são: 1) a fertilidade do solo e a incidência de doenças na estação experimental, por exemplo, podem ser diferentes das verificadas nas fazendas do entorno; 2) os solos ou outras condições físicas da estação experimental não representam a gama de variação das fazendas da região; 3) quando o objetivo é testar tecnologias sob as limitações de recursos experimentadas pelos agricultores; 4) quando se visa avaliar tecnologias sob os níveis de manejo utilizados pelos agricultores; 5) necessidade de avaliar as tecnologias na escala em que vão ser implementadas pelos agricultores; 6) identificação de problemas de manejo que não aparecem em parcelas pequenas; 7) posicionamento de tecnologias nos sistemas de produção; 8) objetivo de estabelecer rede de discussão sobre práticas de manejo, restrições, oportunidades e atitudes em relação às novas tecnologias; 9) reconhecimento dos meios com que os agricultores modificam tecnologias para adequá-las a sua realidade; e 10) criação de oportunidades para os agricultores testarem e selecionarem tecnologias.

Ensaios *on-farm*, no entanto, não são substitutos dos ensaios nas estações experimentais, mas, sim, complementares (Mettrick, 1993). Para Kyveryga et al. (2015), os agricultores podem manejar melhor suas lavouras com dados coletados nas próprias fazendas. Resultados de ensaios *on-farm* compilados de vários talhões e anos podem melhorar o entendimento de como as práticas de manejo, produtos, clima e variabilidade do solo afetam o rendimento de grãos e a lucratividade. Portanto, sua aplicabilidade é mais específica para o produtor, propriedade ou talhão em estudo. Nielsen (2008) destaca que a realização de ensaios *on-farm* não somente procura identificar respostas para questões importantes mas pode, também, validar respostas previamente obtidas ou convencer agricultores que uma prática de manejo alternativa é rentável nas condições de cultivo da propriedade. Entretanto, o autor considera que pesquisa *on-farm* não é sinônimo de demonstração *on-farm*. O propósito das demonstrações *on-farm* não é identificar ou validar respostas para questões de pesquisa, mas para simplesmente ganhar experiência com novas tecnologias ou práticas culturais.

Para Piepho et al. (2011), ensaios *on-farm* são considerados como um tipo de experimento que é similar, de muitas maneiras, a experimentos em casas de vegetação (conduzidos em vasos) ou em parcelas de campo nas estações experimentais. Comparados com ensaios nas estações experimentais, os ensaios *on-farm* têm maior relevância prática e validade, mas podem ter menor precisão devido à maior heterogeneidade dentro da área usada na fazenda.

Existem três tipos básicos de ensaios *on-farm*: os exploratórios, que são os com foco em tecnologias sobre as quais se conhece pouco quanto ao desempenho na área alvo, os ensaios adaptativos (para adaptar opções técnicas a fim de superar restrições, para se adequar aos sistemas de produção locais) e os ensaios de validação (para comparar uma nova tecnologia com a tecnologia em uso pelos agricultores em diversas condições de cultivo) (Mettrick, 1993).

Apesar de muito utilizados em formato convencional, é relativamente recente o uso de ensaios *on-farm* em áreas de AP, apresentando finalidades e metodologias específicas. A utilização dessa abordagem em AP foi facilitada pelo aumento na utilização de ferramentas/metodologias como Sistemas de Posicionamento Global (SPG/GPS), mapeamento do solo em malha (grid), piloto automático, monitores de colheita, controladores para aplicação de insumos em taxa variável, estabelecimento de zonas de manejo (ZM), entre outros. A disponibilidade dessas tecnolo-

gias possibilita, na atualidade, facilidade na realização dos ensaios, que se tornaram menos dependentes de mão de obra e de menor custo.

Para Bramley et al. (2006), a utilização de tecnologias que permitem aplicação de insumos a taxa variável (*Variable Rate Technology* – VRT) dá suporte à realização de ensaios *on-farm,* possibilitando a implantação do desenho experimental mais facilmente e de forma automática, sem necessidade de parar o trabalho para a mudança de doses, por exemplo. Também permite variar doses de acordo com a escolha do agricultor, implementando automaticamente desenhos experimentais mais complexos e mantendo um registro detalhado do que e onde foi feito. Além disso, muitos equipamentos de VRT têm capacidade de evitar sobreposições e perdas de tratamentos, registrando a dose efetivamente aplicada.

Uma questão importante a ser considerada quando da realização de ensaios *on-farm* é o nível de caracterização prévia da área. Quanto maior o nível de detalhamento e histórico de dados da área, mais assertivos serão os ensaios e resultados. Nesse sentido, é importante considerar a filosofia de "Zonas/Ambientes de Manejo". A ZM é uma sub-região da lavoura que apresenta certa semelhança em relação à variabilidade espacial de outra sub-região, identificada pela combinação de fatores limitantes de produtividade que podem ser manejados numa mesma taxa de aplicação de insumos (Grego et al., 2014). A persistência de diferença entre zonas, mesmo após amostragem de solo e fertilização à taxa variada, se explica, em parte, pela existência de características de difícil alteração ao longo do tempo (como relevo, exposição solar, profundidade de horizontes, textura e capacidade de armazenamento de água do solo, entre outras), apresentando, portanto, potenciais produtivos diferentes (Schwalbert; Corassa; Amado, 2016). Santi et al. (2016) reportaram, por exemplo, que a estabilidade dos macroagregados (> 4,76 mm) e a taxa de infiltração de água foram parâmetros eficientes para distinguir zonas de rendimento de grãos em Oxisolos manejados por muito tempo em Sistema Plantio Direto, no sul do Brasil.

A caracterização adequada da área e o estabelecimento de ZMs abre oportunidade de indicar manejo específico para cada ZM, com benefícios em melhoria do potencial produtivo, e da rentabilidade, com redução de custos e do impacto ambiental. Um exemplo disso é o trabalho de Schwalbert et al. (2019), demonstrando resposta diferente a doses de nitrogênio no rendimento de grãos de trigo de acordo com a ZM, com impactos agronômicos e econômicos interessantes. Da mesma forma, Corassa et al. (2019) demonstraram desempenho diferente de cultivares de soja, dependendo da classe de potencial de rendimento de grãos (baixo, médio e alto) da área, com variação do rendimento de grãos e da rentabilidade pela escolha do melhor genótipo a ser cultivado conforme a classificação da área.

Ao mesmo tempo em que o apoio de dados obtidos por meio de ensaios *on-farm* é uma etapa do ciclo de AP, representando uma oportunidade de qualificação do processo, especialmente como auxílio na tomada de decisão de manejo, há uma série de cuidados metodológicos e desafios que devem ser levados em consideração para que se possa utilizar os resultados dessa abordagem com a maior efetividade possível.

Atualmente, existem vários "Guias práticos" ou "Indicações metodológicas" para realização de ensaios *on-farm*, como, por exemplo, os disponibilizados pela Iowa Soybean Association (Kyveryga et al., 2015), pela Universidade de Purdue (Nielsen, 2008), pela Universidade de Nebraska-Lincoln (Coltrain et al., 2017); pela Grains Research & Development Corporation (Bramley et al., 2006); e pela ADAS Agronomics (Kindred et al., 2018), entre outros. Cada um contribui com aspectos importantes para o planejamento, realização, interpretação e uso das informações geradas nos ensaios *on-farm*. Entretanto, é necessário ampliar as informações e gerar indicações específicas para as diferentes condições de produção encontradas no Brasil, uma vez que a área produtiva no país é extensa e existem muita variabilidade e particularidades nas condições edafoclimáticas, nos sistemas de produção, no uso de tecnologias e na adoção de práticas de manejo.

A presente publicação tem por objetivo colaborar com discussão sobre ensaios *on-farm* em AP no Brasil abordando suas oportunidades/potencialidades e dificuldades/desafios. Indicações metodológicas serão abordadas em capítulo específico desta obra. Não há, no entanto, pretensão de cobrir todos os aspectos sobre experimentação *on-farm*. Para tanto, foram considerados, como base para discussão, alguns estudos de casos realizados no âmbito do Projeto Embrapa "11.14.09.001.01.00 – Tecnologias Habilitadoras 1 para automação e AP: sistemas de produção agrícola em grande escala", com a utilização de culturas e sistemas de produção em diferentes regiões do Brasil (Pires; Brandão, 2022). O projeto é uma parceria da Embrapa com universidades, produtores rurais, cooperativas, usinas produtoras/processadoras de cana-de-açúcar, fornecedores de equipamentos, prestadores de serviço em AP, entre outros.

2 OPORTUNIDADES

A realização de ensaios *on-farm* é uma oportunidade para aprimoramento do manejo das áreas de pro-

dução agrícola, com reflexos potenciais em rendimento de grãos e/ou aumento da rentabilidade e busca de sustentabilidade. Um conjunto de possibilidades pode ser considerado, sendo algumas de uso genérico e outras para cada cultura agrícola. Na Tabela 1 estão listados alguns exemplos de oportunidades de temas/tratamentos para realização de ensaios *on-farm* em algumas das culturas agrícolas mais importantes no Brasil.

Especificamente sobre o processo de experimentação *on-farm*, a primeira oportunidade é no campo da compreensão dos objetivos e benefícios potenciais desse tipo de trabalho. Na realização de ensaios *on-farm*, a interação com uma instituição de pesquisa ou empresa prestadora de serviço, muitas vezes, é encarada como uma estratégia de obtenção dados da propriedade para uso de terceiros. Na realidade, é preciso construir o entendimento de que a experimentação *on-farm*, na maior parte das vezes, tem como objetivo principal a geração de resultados aplicáveis ao talhão de lavoura em estudo, portanto, com benefícios diretos para a própria fazenda. Para isso, é preciso a coleta de dados do local e o estabelecimento de relações de confiança entre os parceiros sobre acesso e uso das informações.

3 DIFICULDADES E CUIDADOS NA EXPERIMENTAÇÃO ON-FARM

Além das oportunidades, a realização de ensaios *on-farm* com qualidade adequada ainda apresenta uma série de dificuldades, limitações e desafios que devem ser considerados. Nos estudos de caso realizados com diferentes culturas agrícolas em várias regiões do Brasil foi possível verificar algumas situações que se repetem em outras propriedades agrícolas que utilizam AP em diversos níveis de implantação, representando aspectos que merecem reflexão (Tabela 2).

Tabela 1. Exemplos de algumas oportunidades de temas/tratamentos para realização de ensaios *on-farm* em culturas agrícolas exploradas em larga escala no Brasil.

Tema/tratamento	Soja	Milho	Trigo e outros cereais de inverno	Algodão	Cana-de-açúcar
Culturas antecessoras/rotação de culturas/cultivos consorciados	X	X	X	X	
Culturas intercaladas/antecessoras em período de reforma do canavial					X
Densidade de semeadura/população de plantas	X	X	X	X	
População de plantas em área de reforma/sistema de produção de mudas – meiosi					X
Cultivares	X	X	X	X	X
Microrganismos fixadores de nitrogênio, promotores do crescimento de plantas e agentes de controle biológico de doenças e pragas	X	X	X	X	X
Tratamento de sementes (inseticida e fungicida)	X	X	X		
Tratamento de sementes (deslintamento, inseticida e fungicida)				X	
Tratamentos térmicos de colmos em viveiros					X
Uso de produtos sintéticos promotores do desenvolvimento/rendimento de grãos/precocidade na maturação (hormônios/estimulantes, fertilização foliar, entre outros)	X	X	X	X	X
Ajuste ou validação de doses, formas, épocas de fornecimento de macro e micronutrientes e suas combinações	X	X	X	X	X
Controle de pragas e doenças (produtos, estádios, monitoramento x calendário)	X	X	X	X	X
Aplicação de regulador de crescimento (estádios, monitoramento)			X	X	X
Sistema de produção por uso do produto final e interação com a variabilidade da área de cultivo (ex. trigo pão, trigo exportação/ração/etanol, duplo propósito)			X		
Diferentes sistemas de manejo do solo: tráfego de máquinas e mecanização, controle da compactação, plantas de cobertura e diversificação de espécies, adubação de sistema	X	X	X	X	X
Avaliação/validação de novas tecnologias	X	X	X	X	X
Combinação das opções anteriores com o conceito de zonas de manejo, criteriosamente identificadas com o ferramental de AP	X	X	X	X	X

Tabela 2. Algumas dificuldades relatadas na realização dos estudos de caso envolvendo ensaios *on-farm* conduzidos pela Rede AP em diferentes sistemas de produção de culturas de larga escala no Brasil.

Item	Dificuldade/limitação
1	Necessidade de estabelecimento de relações de confiança com produtor rural e demais prestadores de serviço na área de AP e correlatas.
2	Falta de entendimento, por parte do produtor rural/equipe da fazenda, de que a filosofia do uso da AP na propriedade (e dos ensaios *on-farm*) deve ir além da busca somente pelo aumento de produtividade, compreendendo também aspectos de uso racional da terra e dos insumos, bem como adequações operacionais, ambientais e sociais, que, com o tempo, provavelmente serão exigidos como itens de conformidade das atividades agropecuárias.
3	Falta de entendimento dos objetivos dos ensaios *on-farm* por parte do produtor.
4	Falta de entendimento, por parte do produtor rural/equipe da fazenda e de parceiros fornecedores de insumos e serviços e da própria equipe responsável pela pesquisa, de que os ensaios *on-farm* devem ser, prioritariamente, automatizados, utilizando as ferramentas de AP disponíveis, minimizando o uso de amostragens manuais e conceitos de experimentação convencional utilizados em estações experimentais.
5	Restrições de acesso e integração com os diferentes prestadores de serviço/plataformas que atuam e são utilizados pela propriedade.
6	Necessidade de domínio da interpretação dos dados coletados e seu uso para impactar na tomada de decisões de manejo.
7	Falta de entendimento de que a realização de ensaios *on-farm* tem or propósito principal auxiliar no manejo da propriedade rural e não somente coletar dados para outros usos pela pesquisa.
8	Variação e incompatibilidade da grade amostral utilizada por prestadores de serviço para caracterização da variabilidade do solo (e de outras características) das áreas da propriedade, com reflexos na confiabilidade do estabelecimento de zonas de manejo e das indicações de intervenções para a área em estudo.
9	Falta de equipamentos, de calibração/manutenção de sensores e de ferramentas utilizadas para caracterizar as áreas. Falta de assistência técnica ou intempestividade no serviço prestado, dificultando a automação dos ensaios.
10	Falhas na cobertura de GPS e de acesso a plataformas utilizadas para visualização/integração de dados no campo.
11	Perda de dados críticos para a caracterização das áreas e/ou que mostrem os resultados dos ensaios *on-farm*.
12	Intempestividade na disponibilização dos dados para tomada de decisão, visando a intervenções de manejo nas áreas em estudo no momento apropriado.
13	Falta de caracterização prévia da variabilidade da área para facilitar o planejamento do ensaio *on-farm* e a tomada de decisões de manejo.
14	Dificuldades de intercomunicação para compartilhamento/reconhecimento de informações via arquivos computacionais entre softwares e com os diversos sistemas e equipamentos em uso no cotidiano da fazenda.
15	Necessidade de calibração prévia e tratamento dos dados brutos coletados por sensores de colheita para filtragem de *outliers* e mapeamento final de maior confiabilidade.
16	Equipamentos não apropriados para a aplicação dos tratamentos a serem avaliados nos ensaios *on-farm*, por exemplo, que apresentam problemas de regulagem ou deriva de adubo durante a distribuição na modalidade a lanço.
17	Falta de metodologias e critérios padronizados para caracterização das áreas e definição de zonas de manejo.
18	Variação repentina nas condições meteorológicas durante operações críticas, tal como a ocorrência de chuva constante após iniciada a semeadura, atrasando o dia de sua conclusão quando o experimento ocupa grande extensão de área.
19	Inexistência de estação meteorológica próxima ao ensaio ou mesmo perda de registros de dados meteorológicos, fundamentais como parte das observações a serem consideradas na análise e interpretação dos resultados de pesquisa *on-farm*.
20	Necessidade de sobreposição ou proximidade das linhas de semeadura/plantio a cada novo cultivo, para preservar os limites das parcelas, podendo criar dificuldades operacionais ao maquinário, que funciona melhor quando não há coincidência exata com o sulco da safra anterior.
21	Falta de alinhamento da equipe que faz o manejo da propriedade com os fundamentos da pesquisa e dos ensaios *on-farm*. Por exemplo, necessidade de respeitar tratamentos, não gerar confundimento com outros manejos aplicados, colheita mecanizada com sensor para geração de mapa de colheita etc.
22	Utilização de área de produção para fazer pesquisa como a realizada em estações experimentais (parcelas pequenas, muitas repetições, amostragens manuais, entre outros), desconsiderando os princípios de cada tipo de pesquisa.
23	Informações fornecidas por diferentes prestadores de serviço/plataformas de AP subaproveitadas ou meramente ilustrativas, sem domínio da interpretação e liberdade para tomada de decisão pela própria equipe técnica da fazenda.
24	Falta de capacitação específica da equipe da fazenda sobre AP e princípios/requisitos para realização de ensaios *on-farm*.
25	Necessidade de compreensão, pelo produtor parceiro, de que muitos tipos de pesquisa em áreas de produção consolidadas (como é o caso de ensaios de adubação em lavouras sob sistema plantio direto há muitos anos) demandam condução de experimentos de longo prazo para obtenção de resultados conclusivos, sendo comum não se comprovar hipóteses ou só alcançar as respostas esperadas avaliando-se um ou dois ciclos de cultivo. Além disso, pode também ser necessária a manutenção de tratamentos cuja produtividade fique abaixo da média da fazenda (testemunhas ou controles sem fornecimento de um ou mais nutrientes).

As dificuldades refletem, em parte, a variabilidade quanto ao tempo de adoção e ao nível de entendimento sobre o espectro de aplicações potenciais da AP, dos critérios requeridos e das práticas efetivamente utilizadas nas propriedades, bem como da integração e maturidade da rede de atores de suporte técnico/operacional disponível em cada local.

As dificuldades encontradas, por outro lado, representam oportunidades de evolução no processo de experimentação *on-farm* no âmbito da AP. Algumas delas podem ser superadas pela aproximação dos diferentes atores que interagem na propriedade rural sobre o tema e, também, pela qualificação do pessoal da propriedade que realiza os processos práticos. É fundamental que o processo seja dominado, com avaliação crítica, pelo time da fazenda, diminuindo a atuação como coadjuvantes, que somente encaminham dados e recebem prescrições para aplicação de insumos.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Do ponto de vista de quem desenvolve metodologias para pesquisa *on-farm*, diante da constante atualização tecnológica e mercadológica vinculada à AP, em interação com as pessoas no âmbito da fazenda, os pesquisadores podem ter ideias para um melhor ajuste de uma operação isolada ou até mesmo para soluções complexas envolvendo a integração de diversos processos, gerando inovação. Interessante, porém, é que as inovações desenvolvidas na pesquisa *on-farm* sejam customizadas para a realidade das fazendas.

Assim, há diversos caminhos a percorrer para a geração de soluções integradas de implementação, monitoramento, análise de desempenho e reorientação contínua, para melhoria de processos no campo. Nesse sentido, sobretudo num país continental como o Brasil, a pesquisa *on-farm* é um pré-requisito, etapa indispensável para viabilização técnica e econômica de abordagens da AP, rumo, "com os pés no chão", à agricultura digital ou 4.0.

REFERÊNCIAS

BRAMLEY, R.; COOK, S.; ADAMS, M.; CORNER, R. Designing your own on-farm experiments: how PA can help. In: GRDC (org.). **Grains Research & Development Corporation**. Canberra: GRDC, 2006. 36 p.

COLTRAIN, J.; BERG, S.; STAHL, L.; THOMAS, J. **Field studies:** setting up a trial. Lincoln: University of Nebraska, 2017. Disponível em: https://cropwatch.unl.edu/2017/field-studies-setting-trial. Acesso em: 20 abr. 2022.

CORASSA, G. M.; SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; REIMCHE, G. B.; GAVIRAGHI, R.; BISOGNIN, M. B.; PIRES, J. L. F. Performance of soybean varieties differs according to yield class: a case study from Southern Brazil. **Precision Agriculture**, v. 20, p. 520-540, 2019. Disponível em**:** https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/207339/1/ID44837-2019v20p520PrecisionAgriculture.pdf. Acesso em: 20 abr. 2022.

GREGO, C. R.; RODRIGUES, C. A. G.; VICENTE, L. E.; BOLFE, E. L.; VICTORIA, D. C. Agricultura. In: TÔSTO, S. G.; RODRIGUES, C. A. G.; BOLFE, E. L.; BATISTELLA, M. (ed.) **Geotecnologias e Geoinformação.** Brasília, DF: Embrapa, 2014. p.135-148. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas). Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/103408/1/Cap.-9.pdf Acesso em: 20 abr. 2022.

KINDRED, D.; CLARKE, S.; ROQUES, S.; HATLEY, D.; BERRY, P.; SYLVESTER-BRADLEY, R. **Guide to farmers' crop trials.** Londres: ADAS Agronomics, 2018. 12 p. Disponível em: https://www.yen.adas.co.uk/sites/default/files/2019-10/ADAS%20Guide%20to%20Farm%20Trials.pdf. Acesso em: 20 jul. 2022.

KYVERYGA, P.; MUELLER, T.; PAUL, N.; ARP, A.; REEG, P. **Guide to on-farm replicated strip trials.** Iowa: On-Farm Network, Iowa Soybean Association, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/315664663_Guide_to_On-Farm_Replicated_Strip_Trials. Acesso em: 25 abr. 2022.

METTRICK, H. **Development oriented research in agriculture:** an ICRA textbook. Wageningen: ICRA, 1993. 291 p.

NIELSEN, R. L. **A practical guide to on-farm research**. West Lafayette: Purdue University, 2008. Disponível em: https://www.agry.purdue.edu/CCA/2008/Proceedings/NielsenResearch.pdf. Acesso em: 22 abr. 2022.

PIEPHO, H. P.; RICHTER, C.; SPILKE, J.; HARTUNG, K.; KUNICK, A.; THÖLE, H. Statistical aspects of on-farm experimentation. **Crop & Pasture Science**, v. 62, p.721-735, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1071/CP11175. Acesso em: 20 jul. 2022.

PIRES, J. L. F.; BRANDÃO, Z. N. **Experimentação on-farm na agricultura de precisão**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2022. (Documentos / Embrapa Trigo;2022). 154 p. Disponível em: https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1150179/experimentacao-on-farm-na-agricultura-de-precisao. Acesso em abril 2024.

SANTI, A. L.; DAMIAN, J. M.; CHERUBIN, M. R.; AMADO, T. J. C.; EITELWEIN, M. T.; VIAN, A. L.; HERRERA, W. F. B. Soil physical and hydraulic changes in different yielding zones under no-tillage in Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 15, p. 1326-1335, 2016.

SCHWALBERT, R.; AMADO, T. J. C.; REIMCHE, G. B.; GEBERT, F. Fine-tuning of wheat (Triticum aestivum L.) variable nitrogen rate by combining crop sensing and management zones approaches in southern Brazil. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 1, 2019.

SCHWALBERT, R.; CORASSA, G. M.; AMADO, T. J. C. Definição de zonas de manejo utilizando "multi-layers" e sensoriamento remoto "on-the-go": definições e usos. In: SANTI, A. L. et al. (ed.). **Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: CESPOL, 2016. p. 233-249.

2

Inteligência artificial e ciência de dados para o desenvolvimento da agricultura inteligente

Artificial intelligence and data science for the development of smart farming

Ednaldo José Ferreira[1], Alexandre Cláudio Botazzo Delbem[2], Alex Bisetto Bertolla[3], Marcos Cezar Visoli[4], Cassio Antônio Andrade[5], Suzana Lucy Nixdorf[6], Edilene Cristina Ferreira[7]

[1] *Analista, Pesquisador-Associado, Embrapa Instrumentação e Centro de Inteligência Artificial (C4AI - AgriBIO), São Carlos (SP), Brasil, ednaldo.ferreira@embrapa.br*

[2] *Professor, Pesquisador, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (USP-ICMC), Centro de Inteligência Artificial (C4AI - AgriBIO), São Carlos (SP), Brasil, acbd@icmc.usp.br*

[3] *Analista, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, alex.bertolla@embrapa.br*

[4] *Pesquisador, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, marcos.visoli@embrapa.br*

[5] *Mestrando, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (USP-ICMC), São Carlos (SP), Brasil, andrade.cassio@usp.br*

[6] *Professora, Departamento de Química, Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina (PR), Brasil, snixdorf@uel.br*

[7] *Professora, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Araraquara (SP), Brasil, edilene.c.ferreira@unesp.br*

RESUMO

O desenvolvimento da agricultura digital e de precisão é uma das vertentes que prometem provocar uma nova revolução verde na agricultura. O campo produtivo deve se firmar como o principal segmento de desafio científico-tecnológico nas cadeias agroalimentares e, consequentemente, maior provedor de dados às tomadas de decisões das empresas rurais. O sensoriamento diversificado para aquisição de dados do espaço agrícola tem se tornado cada vez mais onipresente. No entanto, extrair valor de variadas e volumosas fontes de dados é uma tarefa complexa. Adicionalmente, a dinâmica e as interações multifatoriais dos agroecossistemas exibem alta complexidade, o que torna a extração de novos conhecimentos e a modelagem altamente susceptíveis aos *drifts* de dados e de conceito. Há enormes expectativas e evidências científicas de que o desafio será travado nas áreas de inteligência artificial e ciência de dados. O sucesso da relação de ambas as áreas com a agricultura deve promover mútuos avanços científicos a todas as envolvidas, assim como contribuir para o desenvolvimento tecnológico de uma *agricultura inteligente plenamente orientada por dados*. Nesse contexto, o objetivo deste capítulo é dispor uma revisão crítica pautada pela literatura, firmando conceitos, acautelando pesquisadores e profissionais quanto à contemporização de áreas precursoras e apontando um paradigma capaz de agilizar e transformar entregas científicas em inovações efetivas. As soluções oriundas da inteligência artificial e da ciência de dados precisam estar comprometidas e/ou alinhadas com áreas histórica e intrinsecamente ligadas às ciências agrárias, como a estatística experimental e a geoestatística, visando credibilizar as entregas de novos valores. As ferramentas de apoio às decisões operacionais podem aproximar as entregas científicas das efetivas inovações nas cadeias agroalimentares. Nesse aspecto, os sistemas de recomendação ao produtor merecem prioridade pela capacidade de melhorar a utilização dos dados, aumentar a acurácia das estimativas dos modelos, customizar recomendações conforme as singularidades do sensoriamento e peculiaridades do agroecossistema e, finalmente, promover maior eficiência nas inovações ante os esforços científicos envidados na solução de problemas agrícolas.

Palavras-chave: inteligência artificial; ciência de dados; agricultura inteligente; sistema de recomendação.

ABSTRACT

The development of digital and precision agriculture is one of the main areas that have promised a green revolution in agriculture. The cultivation field is the main area presenting scientific-technological challenges for agri-food chains and, additionally, the biggest provider of data for decision-making in rural areas. However, while different sensing technologies have become increasingly widespread in agriculture, extracting data from

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000071

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

varied and voluminous data sources is a complex task. Furthermore, the dynamics and multifactorial interactions of agroecosystems are highly complex, with the development of new knowledge and models being extremely susceptible to data and concept drifts. Scientific findings and professional expectations have indicated that the challenge will be met by employing tools from artificial intelligence and data science. A successful relationship between both areas and agriculture should promote mutual scientific advances, as well as supporting the technological development of fully data-driven, smart farming. Thus, the objective of this chapter is to provide a critical review guided by the literature, outlining concepts, drawing researcher's and professional's attention to the adoption of innovative areas, and highlight a paradigm capable of streamlining and transforming scientific input towards effective innovation. The solutions arising from artificial intelligence and data science need to be integrated and/or aligned with areas historically and intrinsically linked to agricultural sciences, such as experimental statistics and geostatistics, in order to make future data more reliable. Tools dedicated to supporting operational decisions can provide greater scientific assistance for effective innovation in agrifood production chains. In this regard, recommender systems deserve priority due to their capacity for improving data application, increasing the accuracy of model estimates, customizing recommendations according to sensing and agroecosystem particularities and, finally, encouraging more efficient innovation through integrating scientific efforts attained to solve agricultural problems.

Keywords: artificial intelligence; data science; smart farming; recommender system.

1 INTRODUÇÃO

O célere desenvolvimento tecnológico ocorrido nas duas últimas décadas tornou a aquisição, o processamento e o armazenamento de dados praticamente ilimitados. A denominada "era digital", iniciada no sobrevir do século XXI, trouxe rápidas e inexoráveis mudanças na organização da produção, na logística, na gestão de processos, na comunicação, nos negócios e em muitos outros campos. Um verdadeiro tsunâmi causado pela transformação digital tem invadido praticamente todos os setores, segmentos e nichos, assim como tem mudado o comportamento e as relações sociais. Essa força motriz já revolucionou as telecomunicações, bens de capital, serviços, saúde, setor automotivo, transportes e outros (Clay; Kitchen, 2018). A transformação digital também deu início a uma nova fase da agricultura, inaugurando a denominada agricultura digital (AD), encerrada na intuitivamente versionada Agricultura 4.0, a qual promete provocar uma nova revolução verde na agropecuária (Marçal et al., 2022).

Embora não haja unanimidade entre especialistas e pesquisadores, a AD é consensual e conceitualmente compreendida como uma extensão da agricultura de precisão (AP) (Marçal et al., 2022). A AD compreende a integração de tecnologias digitais e de comunicação ao processo produtivo agrícola (Marçal et al., 2022). Trata-se, portanto, de um conjunto de estratégias de gestão que se apoia em soluções digitais para adquirir, armazenar, processar, analisar, propiciar interatividade (muitas vezes remota e em tempo real) e integrar dados de contextos espaciais, temporais, pontuais, econômicos, de processos agroindustriais e logísticos, visando otimizar a produtividade, sustentabilidade, qualidade, lucratividade, rastreabilidade, tomada de decisões (gestão) e as práticas de manejo que permeiam os sistemas agroalimentares.

No campo produtivo, o sensoriamento ubíquo do *espaço agrícola* deve representar o maior desafio e principal provedor de dados complexos às tomadas de decisões das empresas rurais. O *sensoriamento remoto* (SR), por exemplo, realizado por meio de plataformas orbitais, estacionárias, aeronaves tripuladas, balões, veículos autônomos não tripulados e outras, tem ampliado significativamente o horizonte de aplicações digitais que visam maximizar a assertividade de gestão permitindo, assim, maior precisão na avaliação do crescimento vegetativo e reprodutivo das culturas, identificação precoce de estresses bióticos e abióticos, entre inúmeras outras.

O *volume* e a *variedade* dos dados de campo já se consolidam como desafios expoentes na Agricultura 4.0. É notável, portanto, que as cadeias agroindustriais devem ser depreendidas no conceitual e tecnologicamente denominado big data. No entanto, este último desvela uma camada extra de complexidade, bem conhecida em outras áreas, trazendo desafios, bem conhecidos, relacionados à eficiência da extração de *insights* (Tantalaki et al., 2019). A capacidade de extração de *valor* dos dados, informações úteis ou mesmo novos conhecimentos dessa intrincada e exponencialmente crescente massa de dados ainda é deveras limitada. De acordo com Morota et al. (2018), tais desafios podem ser enfrentados por meio da aplicação de técnicas de *aprendizado de máquina* (AM) e *mineração de dados* (MD). No prospecto científico-tecnológico da extração de valores dos dados deposita-se, portanto, considerável expectativa de que o AM e a MD aufiram vantagens do big data pa-

ra enfrentar os grandes desafios da agricultura global (Tantalaki et al., 2019).

A *inteligência artificial* (IA) e a *ciência de dados* (CD) têm papéis imprescindíveis ao fortalecimento da AP e à consolidação de uma *agricultura inteligente* (SF, do inglês: *Smart Farming*) orientada por dados. Adicionalmente, a natureza altamente intricada e intrínseca aos desafios agropecuários não pode ser concebida como mero destino de aplicação de técnicas e conhecimentos oriundos de IA e CD, mas assimilada como uma fonte de complexidade ímpar ao avanço científico de ambas as áreas. Inovações, decisões orientadas por dados e novos conhecimentos agropecuários dar-se-ão, fundamentalmente, pela concomitância do desenvolvimento da IA e da CD debruçadas nas particularidades dos desafios agropecuários. Todavia, o sucesso dos esforços científicos para alavancar as inovações na SF orientada por dados requer um *denominador comum*. Nesse contexto, o objetivo deste capítulo é firmar conceitos, apresentar uma revisão crítica com base na literatura e apontar um caminho para um denominador comum que fortaleça o elo entre ciência e inovação efetiva, ampliando assim a adesão sistemática da IA e da CD na SF plenamente orientada por dados.

2 CONCEITUALIZAÇÃO DA IA E DA CD

É bastante comum que IA e CD sejam tratadas como sinônimos nas literaturas técnicas e científicas, algo que decorre da forte interação e mútua troca de conhecimentos entre ambas as áreas. Para efeitos midiáticos e de aplicação, tal indistinção não gera desconcerto. O discernimento se faz mister no âmbito científico, ante o propósito de generalizar as contribuições oriundas da SF a outras áreas do conhecimento.

2.1 Inteligência artificial e aprendizado de máquina

A definição de IA é mais bem compreendida quando da descrição de seus propósitos. De acordo com Grosan e Abraham (2011), o propósito da IA é "criar máquinas que resolvem problemas que, quando solucionados por humanos, requerem inteligência". Trata-se de uma área de pesquisa que se ocupa com o desenvolvimento de algoritmos que, programados em computadores, aprendem contextos particulares e são capazes de imitar e até superar a inteligência humana no desempenho de tarefas específicas.

O AM é uma subárea de pesquisa da IA, focada no desenvolvimento e aplicação de algoritmos dotados de capacidade de aprender e reconhecer padrões automaticamente a partir dos dados, utilizando o modelo aprendido para generalizar decisões diante de novos casos.

Os modelos de aprendizado profundo (*Deep Learning* – DL) são constituintes de uma subárea particular de AM, com promissoras e intensas pesquisas. Derivam um arcabouço de técnicas que geralmente compartilham estruturas em camadas de algoritmos (unidades de computação) que extraem automaticamente características relevantes de dados não estruturados (ou semiestruturados) como, por exemplo, imagens, vídeos e áudios. Em geral, requerem grandes quantidades de dados para exibirem desempenhos satisfatórios nas suas aplicações. O diagrama estruturado na Figura 1 ilustra a grande área de IA e subáreas nela contidas.

2.2 Ciência de dados

De acordo com Kelleher e Tierney (2018), a CD abrange um conjunto de princípios, definições de problemas, algoritmos e processos para extração de padrões úteis e não óbvios a partir de grandes bases de dados. Tal definição a torna bastante similar ao *processo de descoberta de conhecimento em bases de dados* (*Knowledge Discovery in Databases* – KDD) – popular e sinteticamente referenciado apenas como DM –, mas que se singulariza por absorver desafios ainda mais intrincados como, por exemplo, aquisição, limpeza, transformação, fusão e extração de conhecimentos e *insights* de dados não estruturados e semiestruturados, embrenhando-se nas tecnologias de big data e em questões regulamentares e éticas. A CD se solidifica na nobre missão de recrutar as ciências exatas dedicadas aos dados nas tarefas intensivas de extração de *insights*, informações e novos conhecimentos.

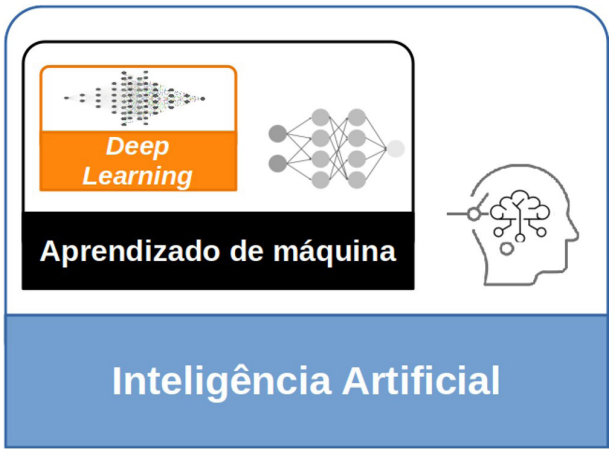


Figura 1. Inteligência artificial, aprendizado de máquina e *Deep Learning*.
Fonte: Autores.

Figura 2. Diagrama adaptado de Palmer (2015).
Fonte original: Data Science for the C-Suite (Digital Living Press, 2015 print).

Em termos didáticos, o diagrama de Venn apresentado na Figura 2 ilustra as interseções entre a matemática, a computação e o domínio do conhecimento, confluência de grandes áreas que particulariza a CD como área que compartilha múltiplos conhecimentos para extração de valor dos dados de um domínio.

A evolução da matemática atada aos múltiplos desafios de aprendizagem a partir de dados deu origem à *estatística*, ciência pautada na extração sistemática de conhecimento e medições das incertezas. A estatística, como área *mater* e virtuosa na compreensão dos significados dos dados, baliza o principal argumento de uma corrente de pesquisadores que defende que a CD é um mito enquanto ciência (ou mesmo uma "*buzzword*"), um ideário sintetizado na interpretação de que a referida área é tão somente corpo metodológico e dados, os quais representariam apenas dois dos quatro elementos que definem uma ciência como tal (Learner; Phillips, 1993; Phillips, 2017). Por outro lado, uma corrente contrária acredita na formação de cientistas de dados sem a necessidade dos embasamentos teóricos atinentes à área de estatística (Hassani et al., 2021; Davison, 2018). O fato inconteste é que o cenário do big data trouxe desafios inéditos, particularmente quanto ao volume, velocidade transacional e, principalmente, variedade de dados não estruturados, aos quais apenas as contribuições pretéritas e atuais edificadas no campo da estatística não catalisam os avanços rápidos e significativos ao contexto; não obstante, subestimá-los é tornar insólita a fundamentação de inúmeras técnicas da IA e da própria CD.

Não há como relegar os avanços significativos de modelagem oriundos da área de computação. Breiman (2001) já havia constatado essas duas frentes de modelagem de problemas, as quais definiu como *cultura de modelagem de dados*, oriunda da estatística/matemática, e *cultura de modelagem algorítmica*, descendida da pesquisa em computação. Logo, a compreensão da CD como ciência reside exatamente na dimensão compartilhada dessas duas culturas de pesquisa (vide intersecção central no diagrama da Figura 2). De acordo com Saltz e Stanton (2017), a CD está profunda e equitativamente ligada à matemática, à estatística e à ciência da computação. Os avanços significativos na capacidade de lidar com problemas complexos são contribuições que procedem da CD (MacGillivray, 2021). Conforme reforça Hassani et al. (2021), estatística e CD são complementares e os profissionais envolvidos em cada uma das áreas devem buscar a ampliação da colaboração mútua.

O balanceamento dos conhecimentos de áreas envolvidas na CD merece ênfase especial na formação do cientista de dados dedicado ao contexto agrícola. O elo histórico e visceral entre estatística e agricultura para compreensão de fenômenos e extração do

conhecimento praticável é devidamente apreendido pelas ciências agrárias. Qualquer corrente de pensamento que possa desguarnecer o arcabouço estatístico-agronômico consolidado, em favor de uma CD exclusivamente fincada nas vertentes do *processamento de dados* ou do AM, será incompleta e pode suscetibilizá-la ao ceticismo enquanto área científica. As habilidades com estatística são importantes para os cientistas de dados (Ribeiro et al., 2017), mas ainda mais imprescindíveis àqueles comprometidos com os avanços da SF orientada por dados.

3 COMPLEXIDADE BIOGEOFÍSICA À MODELAGEM

As interações que ocorrem em agroecossistemas são altamente complexas e, muitas vezes, desconhecidas nos impactos pormenorizados. É de domínio geral que um agroecossistema está condicionado por uma rede complexa de múltiplos fatores macro, sendo mais conhecidos aqueles atrelados aos aspectos climáticos, da planta, do solo (pedológicos e edafológicos), dos recursos e disponibilidade hídrica, dos elementos e estresses bióticos (pragas e doenças), das demandas nutricionais, das singularidades espaciais e temporais, do manejo de intervenção, dentre outros. À vista destes, derivar modelos genéricos, confiáveis e reutilizáveis em agroecossistemas, altamente heterogêneos e variáveis no espaço-tempo, constitui um desafio sem igual quando da comparação com a intensiva aplicação de IA e CD em outros setores. A singularidade idiossincrática de um agrossistema dificulta a portabilidade de técnicas e de modelos previamente treinados, a despeito de condições que aparentam similaridades. Os denominados *drifts de dados e de conceito* tendem a ser consideravelmente mais severos nos desafios do sensoriamento agrícola, na comparação com outros segmentos bem-sucedidos na implementação de uma gestão plenamente orientada por dados.

Apoiar-se somente em modelos paramétricos representa considerável restrição no processo decisório de uma SF orientada por dados. De acordo com Verrelst et al. (2015), os modelos paramétricos são inadequados para derivar produtos biogeofísicos generalizáveis ou operacionais. Os modelos paramétricos pautam sua capacidade de generalização em premissas conceituais para induzir regressões válidas a partir dos dados experimentais. Entretanto, os dados do sensoriamento de campo muitas vezes se apresentam em configurações experimentais significativamente desiguais, com escalas distintas (níveis de folha, de planta ou de copa) ou por características dissemelhantes intrínsecas às tecnologias empregadas e/ou, ainda, sob condições ambientais bastante singulares (Verrelst et al., 2015). Em contrapartida, os modelos não paramétricos não estabelecem pressuposições severamente restritivas, sendo mais adequados e acurados em predições do rendimento da produção agrícola (Gonzalez-Sanchez et al., 2014). Há, portanto, indícios gerais em favor das técnicas de AM (não paramétricas), embora a suscetibilidade à obtenção de *modelos sensor-específicos* ainda imponha baixa transferibilidade ante os dispositivos usados no SR (Verrelst et al., 2015).

Atidos às aplicações de AM, Tantalaki et al. (2019) realizaram uma revisão crítica dos trabalhos científicos que empregaram AM na solução de problemas oriundos da agricultura. Dessa revisão, os autores aglutinaram as técnicas e concluíram o seguinte:

- As *redes neurais artificiais* (RNAs) encontram aplicações mais relacionadas ao SR dos campos agrícolas, sendo mais acuradas e adaptadas do que, por exemplo, as *máquinas de aprendizado extremo* (*Extreme Learning Machines* – ELM). Todavia, por serem dotadas de muitos parâmetros e elevada complexidade, tendem ao *overfitting*. Em adição, demandam grandes conjuntos de dados e métodos otimizados para regularização dos parâmetros ajustáveis do modelo;
- ELM e outras técnicas de neuro-fuzzy são vantajosas na capacidade de generalização do modelo gerado e apresentam desempenhos adequados, mas constituem modelos de "caixa preta" com baixa explicabilidade, demandando pesquisas para comprovação da confiabilidade;
- As árvores de decisão e de regressão são dotadas de maior compreensibilidade, mas são muito sensíveis às pequenas mudanças (adições, modificações ou remoções de instâncias) no conjunto de treinamento, o que as tornam instáveis e suscetíveis ao *overfitting*;
- As SVMs e os métodos de florestas aleatórias (*Random Forest* – RF) apresentam grande potencial para aplicações agrícolas, uma vez que são fáceis de implementar, rápidas na indução e robustas aos ruídos presentes nos dados de treinamento, além de apresentarem menor susceptibilidade ao *overfitting* na comparação com outros métodos. Essas têm sido amplamente utilizadas e consideravelmente populares na pesquisa agrícola, especialmente em problemas de classificação;
- As técnicas e arquiteturas de aprendizado profundo (*Deep Learning* – DL) têm sido promissoras no reconhecimento de padrões em imagens digitais de diferentes naturezas; por outro lado, demandam grande quantidade de dados para obtenção de precisão

e acurácia, algo que aumenta significativamente o custo computacional envolvido com a estrutura e o treinamento do modelo. Além disso, tendem fortemente ao *overfitting*, exigindo a aplicação e o ajuste cuidadoso das técnicas de regularização.

Os apontamentos de Verrelst et al. (2015) e Tantalaki et al. (2019) não intentam o estabelecimento de adequações ou inadequações de aplicações específicas. Ao contrário, são balizadores e indicadores de potencialidades, mantendo abertas as pesquisas em IA e CD nos agroecossistemas.

4 CONTEMPORIZAÇÃO DE ÁREAS PRECURSORAS E CENÁRIO ATUAL

O enveredar da IA e da CD na agricultura encontra áreas precursoras e basilares, dentre elas a *estatística experimental* e a *geoestatística*. Ferreira (2018) ressalta a importância e obrigatoriedade do domínio dos princípios básicos da *experimentação estatística* para salvaguardar a aplicação do método científico na elucidação dos princípios biológicos e solução dos problemas agropecuários. Ele destaca a importância da estatística experimental no melhoramento genético de plantas o que, por extensão, deve reger a fenotipagem de plantas. Andriotti (2003) apresenta, didaticamente, a importância do domínio da geoestatística para desenvolvimento das ciências da terra e do uso das ferramentas de SR. Ele precondiciona, ainda, a compreensão da geoestatística a um domínio prévio da estatística. Os avanços da IA e, principalmente, da CD no desenvolvimento da SF precisam abarcar ambas as áreas a fim de maximizar as contribuições efetivas. A CD, como geradora de *insights* que podem ampliar o domínio do conhecimento e as inovações nas cadeias agroindustriais, deve incorporar o rigor da experimentação estatística para compreensão da causa-efeito.

As estatísticas que medem as efetivas contribuições da IA e da CD no balizamento dos processos decisórios dos sistemas agroalimentares são escassas. Ainda que as tecnologias digitais tenham viabilizado um notório aumento no volume e na diversidade de dados, pouco se sabe sobre a adesão e a sustentabilidade de suas aplicações para tomada de decisões nos ciclos de produção das cadeias. De acordo com um levantamento (amostral) realizado pela *Agricultural Resource Management Survey* (ARMS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), pouco mais de 65% dos produtores de milho que efetivamente adotaram os recursos do maquinário de monitoramento para coletar dados de colheita não os utilizaram sequer para gerar os mapas de produtividade (DeLay et al., 2020). No Brasil, as estatísticas gerais quanto ao uso sistemático (não eventual) dos mapeamentos de solos, culturas e produtividade para tomada de decisões em ciclos subsequentes são desconhecidas ou pouco representativas das cadeias agroindustriais. É notável, portanto, o atual descompasso entre o universo que se desenha nas novidades científicas e o das inovações tecnológicas incorporadas de fato nas práticas agrícolas.

Quais são os caminhos para consolidação de uma agricultura plenamente orientada pela extração sistemática de valores dos dados (*data-driven agriculture*)? Esta é uma pergunta fundamental cuja resposta deve consolidar não apenas as áreas de IA e CD na agricultura digital inteligente mas agilizar e dinamizar as inovações no setor agrícola.

5 TRILHA À INOVAÇÃO SISTEMÁTICA EM AGROECOSSISTEMAS

O principal desafio na AD é a agregação de valor a partir de diferentes fontes de dados (de campo, de safras, de maquinário agrícola, de aspectos econômicos e de outros) para extração de conhecimento (Molin et al., 2020). Nesse sentido, alguns trabalhos têm preconizado o desenvolvimento de *ferramentas de apoio à decisão* que visem os níveis operacionais (Yazdani et al., 2017; Bonfante et al., 2019). O propósito de tais ferramentas é, geralmente, aproximar as contribuições científicas das efetivas inovações nas cadeias agroalimentares.

Peters et al. (2020) apresentam uma abordagem inspirada em *sistemas de recomendação* ao produtor para maximizar a utilização de dados, melhorar as estimativas e a eficiência do esforço científico empenhado na solução de problemas agrícolas. Os sistemas de recomendação são amplamente utilizados nos mais variados tipos de negócios digitais, com inúmeros *cases* de sucesso. Trata-se de uma abordagem poderosa que viabiliza a utilização do conhecimento científico traduzido nos algoritmos inteligentes de recomendação, sendo ainda capazes de lidar com grandes volumes de dados agrícolas para prover recursos para antecipar a dinâmica dos agroecossistemas em constantes mudanças.

Os sistemas de recomendação são dotados de algoritmos que personalizam sugestões oferecidas ao usuário à medida que aprende particularidades extraídas do histórico de dados. Em geral, agregam técnicas/algoritmos de IA, AM e DL para melhorar a precisão das recomendações. Empresas como Google (YouTube), Amazon e Netflix estão entre os *cases* bem-sucedidos que mantêm investimentos contínuos em IA e CD para alavancar sistemas de recomendação assertivos e efi-

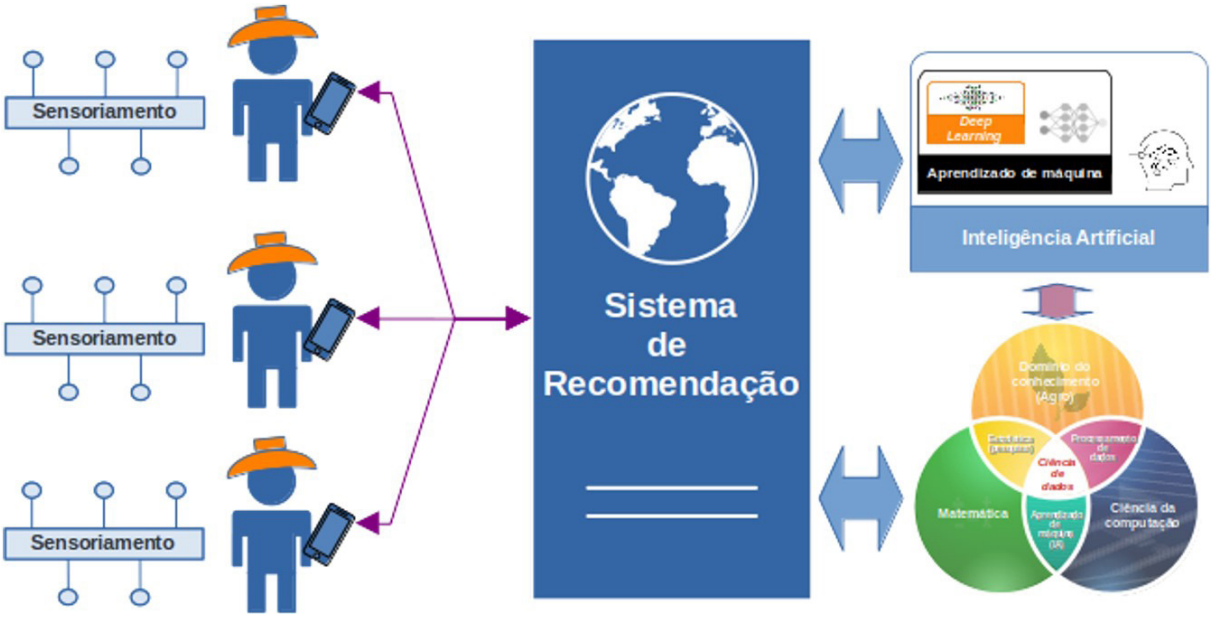


Figura 3. Sistema de recomendação na SF orientada por dados.
Fonte: Autores.

cientes. Na Figura 3 é apresentado um diagrama simplificado de um sistema de recomendação que customiza alertas e sugestões conforme especificidades do sensoriamento e características do sistema produtivo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O grande desafio ao desenvolvimento de uma SF plenamente orientada por dados é a extração de valor de dados diversificados e de grandes volumes. As áreas de pesquisa em IA e CD merecem tônica na AP pelo potencial de impulsionar esse desenvolvimento. A complexidade inerente aos agroecossistemas demandam soluções e inovações que devem ampliar os conhecimentos do domínio de aplicação, bem como da autoevolução científica nela envolvida. A consolidação de uma SF orientada por dados não se resume no esforço de uma engenharia de aplicação atenta ao big data agrícola. Requer contemporização de áreas clássicas e um olhar focado na oferta imediata de valores extraídos de dados. O desenvolvimento de plataformas multifuncionais dotadas de sistemas de recomendação ao produtor é a ponte mais ágil entre pesquisa e inovação.

AGRADECIMENTOS

Às unidades da Embrapa Instrumentação e da Agricultura Digital; ao Instituto de Química da Unesp de Araraquara; à UEL e ao Centro de Inteligência Artificial (IBM-USP-Fapesp), particularmente aos colaboradores do desafio AgriBIO (C4AI-AgriBIO).

REFERÊNCIAS

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2003.

BONFANTE, A.; MONACO, E.; MANNA, P.; DE MASCELLIS, R.; BASILE, A.; BUONANNO, M.; CANTILENA, G.; ESPOSITO, A.; TEDESCHI, A.; DE MICHELE, C.; BELFIORE, O.; CATAPANO, I.; LUDENO, G.; SALINAS, K.; BROOK, A. LCIS DSS-An irrigation supporting system for water use efficiency improvement in precision agriculture: A maize case study. **Agricultural Systems**, v. 176, p. 102646, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102646.

BREIMAN, L. Statistical modeling: the two cultures (with comments and a rejoinder by the author). **Statistical Science**, v. 16, n. 3, p. 199-231, 2001. DOI: http://doi.org/10.1214/ss/1009213726.

CLAY, D.; KITCHEN, N. **Precision agriculture basics**. New York: American Society of Agronomy, 2018. 287 p.

DAVISON, J. **No, machine learning is not just glorified statistics**. Medium, 2018. Disponível em: https://towardsdatascience.com/no-machine-learning-is-not-just-glorified-statistics-26d3952234e3. Acesso em: 28 nov. 2022.

DELAY, N.; Thompson, N.; Mintert, J. **Farm data usage in commercial agriculture**. Purdue: Purdue University, 2020. Disponível em: https://ag.purdue.edu/commercialag/home/resource/2020/01/farm-data-usage-in-commercial-agriculture/. Acesso em: 28 nov. 2022.

FERREIRA, P. V. **Estatística experimental aplicada às ciências agrárias**. Viçosa: Editora UFV, 2018.

GONZALEZ-SANCHEZ, A.; FRAUSTO-SOLIS, J.; OJEDA-BUSTAMANTE, W. Predictive ability of machine learning methods for massive crop yield prediction. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 2, p. 313-328, 2014. DOI: http://doi.org/10.5424/sjar/2014122-4439.

GROSAN, C.; ABRAHAM, A. **Intelligent systems**. A modern approach. 17. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2011.. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-642-21004-4.

HASSANI, H.; BENEKI, C.; SILVA, E. S.; VANDEPUT, N.; MADSEN, D. O. The science of statistics versus data science: what is the future? **Technological Forecasting and Social Change**, v. 173, p. 121111, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121111.

KELLEHER, J. D.; TIERNEY, B. **Data Science**. Massachusetts: MIT Press, 2018.. DOI: http://doi.org/10.7551/mitpress/11140.001.0001.

LEARNER, D. B.; PHILLIPS, F. Y. Method and progress in management science. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 27, n. 1, p. 9-24, 1993. DOI: http://doi.org/10.1016/0038--0121(93)90025-E.

MACGILLIVRAY, H. Statistics and data science must speak together. **Teaching Statistics**, v. 43, n. S1, 2021. DOI: http://doi.org/10.1111/test.12281.

MARÇAL, D.; VALENTE, D. S. M.; CARVALHO PINTO, F. A.; BORÉM, A. **Agricultura digital**. São Paulo: Oficina de Textos, 2022. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-031-14533-9.

MOLIN, J. P.; BAZAME, H. C.; MALDANER, L.; CORREDO, L. P.; MARTELLO, M.; CANATA, T. F. Precision agriculture and the digital contributions for site-specific management of the fields. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, n. 5, 2020. DOI: http://doi.org/10.5935/1806-6690.20200088.

MOROTA, G.; VENTURA, R. V.; SILVA, F. F.; KOYAMA, M.; FERNANDO, S. C. Big Data Analytics And Precision Animal Agriculture Symposium: machine learning and data mining advance predictive big data analysis in precision animal agriculture1. **Journal of Animal Science**, v. 96, n. 4, p. 1540-1550, 2018. DOI: http://doi.org/10.1093/jas/sky014.

PALMER, S. **Data Science for the C-Suite**. New York: Digital Living Press, 2015.

PETERS, D. P. C.; SAVOY, H. M.; RAMIREZ, G. A.; HUANG, H. AI recommender system with ML for agricultural research. **IT Professional**, v. 22, n. 3, p. 30-32, 2020. DOI: http://doi.org/10.1109/MITP.2020.2986125.

PHILLIPS, F. A perspective on 'Big Data. **Science & Public Policy**, v. 44, n. 5, p. 730-737, 2017. DOI: http://doi.org/10.1093/scipol/scx012.

RIBEIRO, V.; ROCHA, A.; PEIXOTO, R.; PORTELA, F.; SANTOS, M. F. Importance of statistics for data mining and data science. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUTURE INTERNET OF THINGS AND CLOUD WORKSHOPS (FiCloudW), 5., 2017, Prague. **Proceedings [...]**. Prague: IEEE, 2017. p. 156-163. DOI: http://doi.org/10.1109/FiCloudW.2017.86.

SALTZ, J. S.; STANTON, J. M. **An Introduction to data science**. Los Angeles: SAGE Publications, 2017

TANTALAKI, N.; SOURAVLAS, S.; ROUMELIOTIS, M. Data-driven decision making in precision agriculture: the rise of big data in agricultural systems. **Journal of Agricultural & Food Information**, v. 20, n. 4, p. 344-380, 2019. DOI: http://doi.org/10.1080/10496505.2019.1638264.

VERRELST, J.; CAMPS-VALLS, G.; MUÑOZ-MARÍ, J. RIVERA, J. P.; VEROUSTRAETE, F.; CLEVERS, J. G. P. W; MORENO, J. Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation bio-geophysical properties – a review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 108, p. 273-290, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.05.005.

YAZDANI, M., ZARATE, P.; COULIBALY, A.; ZAVADSKAS, E. K. A group decision making support system in logistics and supply chain management. **Expert Systems with Applications**, v. 88, p. 376-392, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.07.014.

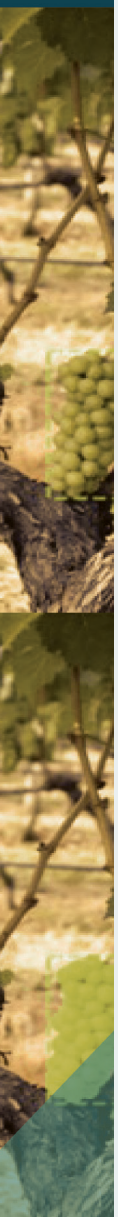
3

Inteligência artificial aplicada na agricultura de precisão e digital

Artificial intelligence applied in precision and digital agriculture

Lucio André de Castro Jorge[1], Lucas Prado Osco[2], José Marcato Júnior[3], Ana Paula Marques Ramos[4], Wesley Nunes Gonçalves[5], Eduardo Antonio Speranza[6], Carlos Manoel Pedro Vaz[7], Ricardo Yassushi Inamasu[8]

[1] *Engenheiro Eletricista, Mestre, Doutor, Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, lucio.jorge@embrapa.br*
[2] *Engenheiro Ambiental, Mestre, Doutor, Professor, Faculdade de Engenharia e Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente (SP), Brasil, lucasosco@unoeste.br*
[3] *Engenheiro Cartógrafo, Mestre, Doutor, Faculdade de Engenharia, Arquitetura, Urbanismo e Geografia da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande (MS), Brasil, jose.marcato@ufms.br*
[4] *Engenheiro Cartógrafo, Mestre, Doutor, Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista de Presidente Prudente, Presidente Prudente (SP), Brasil, anaramos@unoeste.br*
[5] *Engenheiro de Computação, Faculdade de Ciência da Computação da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande (MS), Brasil, wesley.gonçalves@ufms.br*
[6] *Cientista da Computação, Mestre, Doutor, Pesquisador, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, Eduardo.speranza@embrapa.br*
[7] *Físico, Mestre, Doutor, Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, carlos.vaz@embrapa.br*
[8] *Engenheiro Mecânico, Mestre, Doutor, Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, ricardo.inamasu@embrapa.br*



RESUMO

A integração da IA tem revolucionado a maneira como os dados agrícolas são coletados, analisados e interpretados, destacando-se particularmente o uso de imagens obtidas por veículos aéreos não tripulados (VANTs) e a análise avançada de séries temporais por meio da fusão de dados. O presente trabalho explora os avanços e as novas perspectivas trazidas pela aplicação de técnicas de inteligência artificial (IA), com um enfoque especial no *deep learning* (DL), dentro do contexto da agricultura de precisão e digital. As tecnologias de DL, incluindo redes neurais convolucionais (CNNs), estão no epicentro dessa transformação. Essas redes profundas permitem não apenas a detecção eficiente de objetos e o monitoramento detalhado das condições agrícolas utilizando dados RGB e multi e hiperespectrais, mas também viabilizam a otimização dos processos agrícolas. Aqui discute-se como essas tecnologias contribuem significativamente para a redução de custos e minimização dos impactos ambientais por meio de aplicações operacionais em tempo real. Além disso, apresenta-se uma revisão abrangente das técnicas de DL que estão sendo aplicadas na agricultura, destacando suas contribuições para o avanço da agricultura digital e de precisão. Também se discute como a adoção crescente de GPUs e clusters de processamento está impulsionando inovações significativas no setor, focando especialmente na implementação dessas tecnologias em VANTs, robôs e máquinas agrícolas. Essa análise detalhada não apenas ilustra o potencial transformador da IA na agricultura, mas também propõe caminhos para futuras pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos que poderiam otimizar ainda mais a produção agrícola e promover práticas de cultivo mais sustentáveis e eficientes.

Palavras-chave: aprendizagem de máquina; sensoriamento remoto; aprendizagem profunda; VANT; agricultura de precisão.

ABSTRACT

The integration of AI has revolutionized the way agricultural data are collected, analyzed, and interpreted, with a notable emphasis on the use of images captured by Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and advanced time-series analysis through data fusion. This work explores the advancements and new perspectives brought about by the application of Artificial Intelligence (AI) techniques, with a special focus on Deep Learning (DL), within the context of precision and digital agriculture. DL technologies, including convolutional neural networks (CNNs), are at the epicenter of this transformation. These deep networks enable not only efficient object detection and detailed monitoring of agricultural conditions using RGB, multi-spectral, and hyper-spectral data but also facilitate the optimization of agricultural processes. Here, we discuss how these technologies significantly contribute to

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000082

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

cost reduction and the minimization of environmental impacts, through real-time operational applications. Moreover, a comprehensive review of DL techniques being applied in agriculture is presented, highlighting their contributions to the advancement of digital and precision agriculture. We also discuss how the growing adoption of GPUs and processing clusters is driving significant innovations in the sector, focusing especially on the implementation of these technologies in UAVs, robots, and agricultural machinery. This detailed analysis not only illustrates the transformative potential of AI in agriculture but also proposes pathways for future research and technological developments that could further optimize agricultural production and promote more sustainable and efficient farming practices.

Keywords: Machine learning; remote sensing; deep learning; UAV; precision agriculture.

1 INTRODUÇÃO

A inteligência artificial é uma área da computação e tem sido aplicada em diferentes áreas, destacando-se na agricultura de precisão e digital com o uso de reconhecimento de padrões e aprendizado de máquina (*machine learning* – ML, incluindo o aprendizado profundo, *deep learning* – DL). A principal importância da inteligência artificial na agricultura de precisão está na análise de grandes conjuntos de dados, aprendendo padrões que possibilitem, por exemplo, identificar a variabilidade no campo ou antecipar a produtividade de uma lavoura e criar alguns processos automatizados.

O uso de inteligência artificial (IA) pode ser capaz de reconhecer por um sistema computacional todos os padrões ensinados. É por essa razão que muitos dos problemas importantes de IA podem ser caracterizados, como classificações e agrupamentos de medições de temperatura, dados climáticos, valores espectrais, dentre outros. O reconhecimento de padrões por um sistema computacional é capaz de aprender e diferenciar os dados. Para o processamento desses dados, existem várias técnicas, tais como árvores de decisão, florestas aleatórias, k-vizinhos mais próximos, máquinas de vetores de suporte, redes neurais, dentre outras (Bishop, 2006). A aplicação de técnicas de IA pode indicar, por exemplo, que uma dada sequência de valores de temperatura está dentro da normalidade, que uma cultura está com certa praga, ou que o objeto que está em determinada posição em uma imagem é uma laranja.

O aprendizado de máquina é uma subárea da inteligência artificial, representando os algoritmos que aprendem com os padrões que lhes foram apresentados. Em geral, o aprendizado de máquina é dividido em: supervisionado, quando a partir de um conjunto previamente definido de dados rotulados deseja-se encontrar uma função que seja capaz de predizer rótulos desconhecidos; e não supervisionado, em que se busca identificar grupos ou padrões a partir dos dados (Russel; Norvig, 2020). No aprendizado não supervisionado o conjunto de dados utilizado não possui nenhum tipo de rótulo. O objetivo desse tipo de aprendizagem é detectar similaridades e anomalias entre os objetos analisados. O processo de agrupamento de objetos em classes similares é denominado clusterização, a qual pode ser utilizada para segmentação de dados, particionando grandes conjuntos de dados de acordo com a similaridade entre subconjuntos e algoritmos hierárquicos que não exigem a identificação de representantes iniciais e nem da quantidade de grupos desejada (Russel; Norvig, 2020).

O aprendizado supervisionado de máquina consiste em apresentar uma grande quantidade de dados previamente classificados e fazer com que se aprenda a partir desses dados. Os principais paradigmas de aprendizado, segundo Russel e Norvig (2020), são:

- Simbólico (árvores de decisão): – baseado em instâncias (k-NN ou k vizinhos mais próximos); – baseado em aprendizado estatístico (SVM – *Support Vector Machines*); – baseado em comitê (*random forest*); – conexionista (redes neurais artificiais – RNA); são modelos computacionais inspirados pelo cérebro humano, capazes de realizar o aprendizado de máquina, bem como o reconhecimento de padrões, que é um dos mais utilizados recentemente. Um exemplo de modelo conexionista é a técnica de *deep learning* (DL) ou aprendizado profundo.

A técnica de aprendizado profundo (*deep learning*), ou redes neurais profundas, é uma técnica de aprendizado de máquina na qual o modelo escolhido para o algoritmo de aprendizado é uma rede neural artificial com muitas camadas.

As redes neurais foram inspiradas pela forma como os neurônios funcionam em sistemas biológicos, nos quais operam de modo paralelo e descentralizado (Russel; Norvig, 2020). Tipicamente, uma rede neural pode conter muitas camadas, dispostas uma após a outra ou em paralelo. Cada uma dessas camadas é composta por um ou mais neurônios, interligados entre si de forma que o resultado dos neurônios que estão em uma camada alimenta a entrada dos neurônios que estão na camada posterior. Existem diferentes algoritmos de treinamento de redes neurais,

sendo mais frequentemente empregado o algoritmo chamado *backpropagation*. Existem muitas arquiteturas de redes neurais disponíveis, como as redes conectadas para frente (*feedforward*), as redes convolutivas, as redes recorrentes e as máquinas de Boltzmann restritas, entre muitas outras (Russel; Norvig, 2020).

A inteligência artificial na agricultura pode ser aplicada em diferentes tipos de dados, desde dados provenientes de sensores operando em campo, embarcados ou não em máquinas, sensores IoT (Internet das coisas), em robôs terrestres, veículos aéreos, dados suborbitais e orbitais, os quais tem cada vez mais se destacado para os sistemas de visão computacional e sistemas de fusão de sensores. Na Figura 1 podem ser observadas as diferentes escalas de sensores utilizados na agricultura digital e que cada vez mais têm sido integrados às fazendas.

Na última década, aplicações realizadas com algoritmos estatísticos e de *machine learning* (ML) foram usadas principalmente em tarefas de classificação/regressão. O aumento dos sistemas de sensoriamento remoto nas diferentes escalas, como apresentado na Figura 1, tem permitido uma ampla coleta de dados na superfície da Terra. Imagens aéreas tornaram-se uma abordagem comum para aquisição de dados com o advento dos veículos aéreos não tripulados (VANT). Estes também são conhecidos como aeronaves remotamente pilotadas (ARP), ou, como em um termo popular, drones (multirrotores, de asas fixas, híbridos etc.). Esses dispositivos têm crescido em disponibilidade no mercado por seu custo relativamente baixo e alta capacidade operacional na captura de imagens de maneira rápida e fácil. A alta resolução espacial das imagens baseadas em VANTs e sua capacidade para múltiplas visitas permitiram a criação de grandes e detalhados conjuntos de dados a serem tratados. O mapeamento de superfície com plataformas VANTs apresenta algumas vantagens em relação ao orbital e outros métodos de aquisição de sensoriamento aéreo. A menor interferência atmosférica, a possibilidade de voar em altitudes mais baixas e, principalmente, o baixo custo operacional tornaram esse sistema de aquisição popular tanto em explorações comerciais quanto científicas. No entanto, a inspeção visual de vários objetos ainda pode ser uma operação demorada, tendenciosa e imprecisa.

Atualmente, o verdadeiro desafio nas abordagens de IA no sensoriamento remoto na agricultura e meio ambiente é obter informações automáticas, rápidas e precisas desses tipos de dados. Nos últimos anos, o advento das técnicas de *deep learning* (DL) tem oferecido métodos robustos e inteligentes para aprimorar o mapeamento da superfície terrestre. DL é um método de rede neural artificial (ANN) com múltiplas camadas ocultas e combinações mais profundas que é responsável por otimizar e retornar melhores padrões de aprendizado do que uma ANN comum. Há uma quantidade impressionante de material de revisão nas revistas científicas explicando técnicas baseadas em DL, sua evolução histórica, uso geral, bem como redes e funções (Osco et al., 2021a). À medida que o processamento e os exemplos rotulados (ou se-

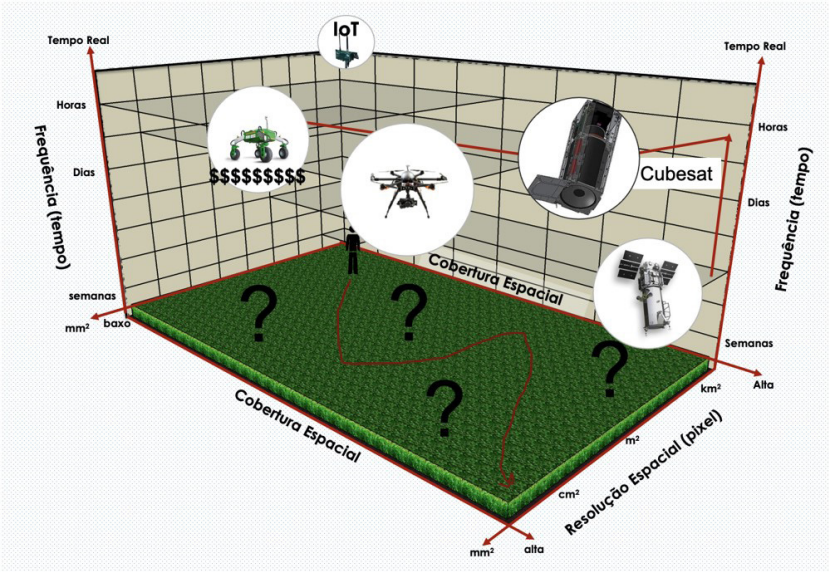


Figura 1. Diferentes escalas espaciais e temporais de fontes de dados utilizados pelos algoritmos de inteligência artificial aplicados na agricultura digital.
Fonte: Feito por Lúcio Jorge.

ja, amostras) se tornaram mais disponíveis nos últimos anos, o desempenho das redes neurais profundas (DNNs) aumentou nos aplicativos de processamento de imagem e sinais. A DNN tem sido aplicada com sucesso em métodos orientados a dados.

Diversos trabalhos aplicam DNN. Embora a DL forneça resultados promissores, muitas observações e exames ainda são necessários. Ma et al. (2019) apresentaram o uso de algoritmos DL em seis subcampos de sensoriamento remoto: fusão, registro, classificação, detecção de objetos, segmentação semântica e análise de objetos.

Osco et al. (2021a) fizeram uma avaliação com um método de processamento de texto para geração de nuvem de palavras nos diversos trabalhos revisados, obtendo o mapa de nuvem de palavras mais utilizadas para área de inteligência artificial aplicada na agricultura (Figura 2). Pode-se observar que as redes convolucionais são destaque no momento, bem como análise e segmentação de dados espectrais e hiperespectrais.

Sendo assim, os métodos DL têm sido aplicados para resolver problemas de classificação, detecção de objetos e segmentação semântica no campo de sensoriamento remoto aplicado na agricultura de precisão, sendo o grande destaque no momento para a inteligência artificial na agricultura. Na Figura 3 pode ser observado um resumo de forma gráfica para as principais aplicações de técnicas de ML e DL no monitoramento agrícola. Verificamos que nas aplicações, apesar dos muitos desafios para uso diário e em larga escala, existem duas grandes vertentes: aquelas que se baseiam em informação espectral, a partir de sensores ópticos, RGB, multiespectral e hiperespectral; bem como aquelas que se baseiam em segmentação de objetos, ou segmentação semântica para tratar os objetos, como plantas, frutos etc.

Na Figura 4 pode ser observado que existem muitos fatores que contribuem para que a análise dos dados e imagens seja feita de forma precisa. Dados bem adquiridos e em diferentes escalas representam parte fundamental para escolha dos algoritmos bem como do pré-processamento necessário. Por exemplo, para efetuar a fusão de dados de diferentes sensores e diferentes escalas é necessário garantir o registro das imagens e dados e evitar misturas na caracterização de padrões. Também, dependendo do sensor, vários parâmetros, como resolução espacial, espectral, radiométrica, devem ser bem calibrados e adquiridos de forma padrão para evitar processamento de dados errados gerando modelos errados.

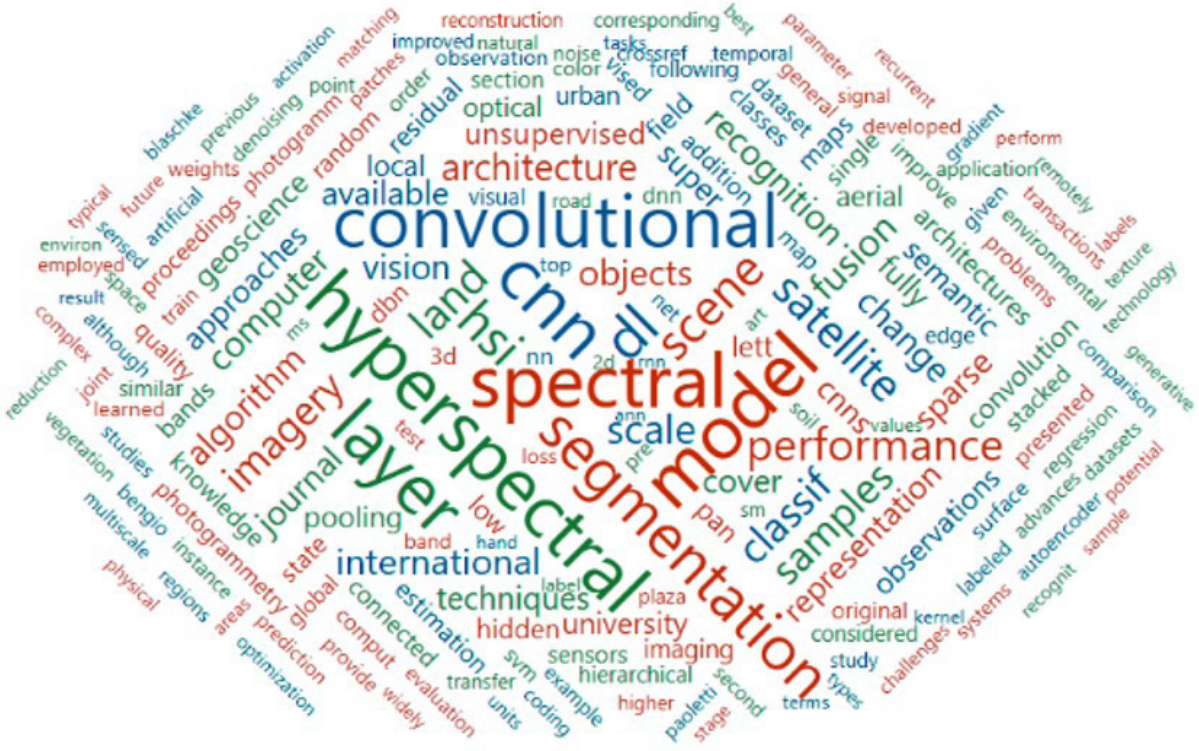


Figura 2. Nuvem de palavras para aplicação de inteligência artificial na agricultura e meio ambiente.
Fonte: Osco et al. (2021a).

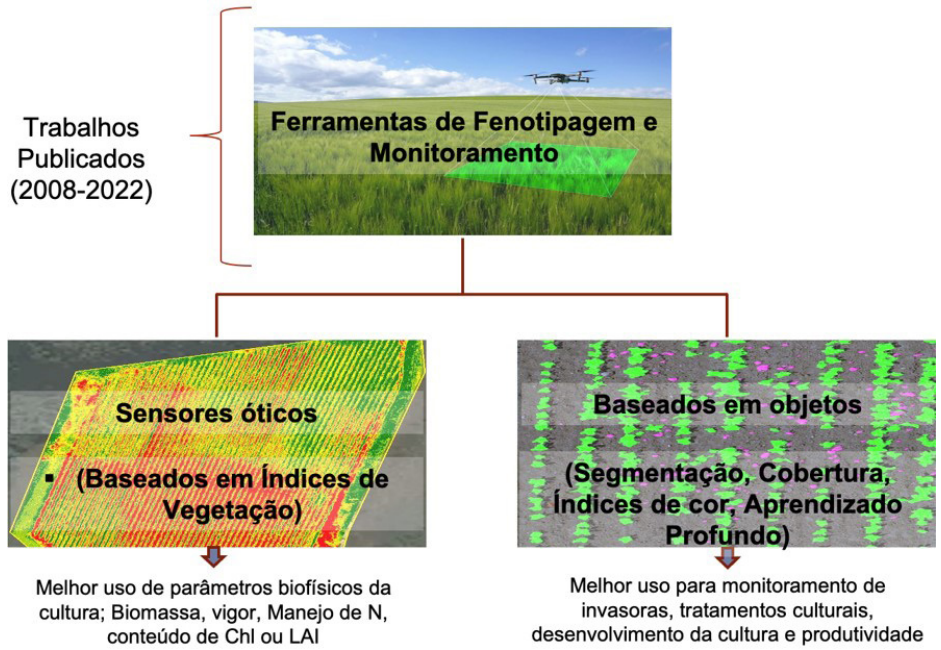


Figura 3. Principais aplicações da inteligência artificial no monitoramento agrícola e na fenotipagem (técnica de melhoramento genético de plantas).
Fonte: adaptado de Phelippe Vigneau.

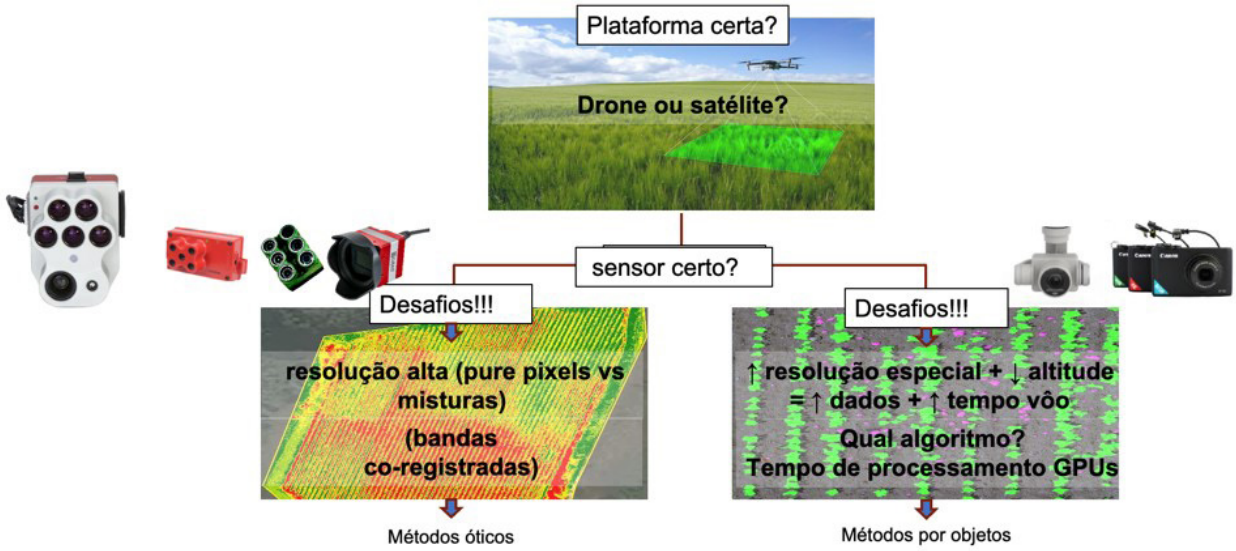


Figura 4. Dificuldades encontradas na obtenção dos dados para aplicação nos algoritmos de ML e DL.
Fonte: adaptado de Phelippe Vigneau.

2 APRENDIZADO PROFUNDO (*DEEP LEARNING*)

O interesse em algoritmos de DL vem crescendo desde meados de 2010, especificamente porque esses algoritmos alcançaram sucesso significativo em tarefas de processamento de imagens digitais (Ma et al., 2019; Khan et al., 2020).

As DNNs mais comuns (Osco et al., 2021a) são geralmente compostas por camadas densas, nas quais as funções de ativação calculam a soma ponderada de entrada e *bias*, decidem se um neurônio pode ser ativado ou não. Essas funções constituem funções de decisão que auxiliam no aprendizado de padrões intrínsecos, ou seja, são um dos principais aspectos de como cada neurônio aprende a partir de sua interação com os outros neurônios. As funções de ativação comumente aplicadas podem ser lineares, sigmoidais, tangentes hiperbólicas, máximo, unidades lineares retificadas (ReLu) e variantes de ReLu, in-

cluindo ReLu com vazamento, unidade linear exponencial (ELU) e unidade linear retificada paramétrica (PReLU). Além da função de ativação, outra informação importante sobre o funcionamento de uma DNN está relacionada a suas camadas, como *dropout*, *batch-normalization*, *convolution*, *deconvolution*, *max-pooling*, *encode-decode*, *memory cells*, entre outras. As camadas de *dropout* são importantes para introduzir a regularização dentro da rede, pois ela escolhe aleatoriamente conexões e unidades com uma determinada probabilidade. Isso não apenas ajuda a reduzir o *overfitting,* removendo a presença de conexões coadaptadas, mas também melhora sua generalização e contribui para taxas de aprendizado otimizadas e mais rápidas. A camada de normalização do lote atua como um fator regulador e suaviza o fluxo do gradiente de perda, o que também melhora a generalização (Osco et al., 2021a).

A organização na qual essas e outras camadas são compostas bem como seus parâmetros definem a topologia da rede. Além da topologia, os métodos de otimização mais usados são Adam, algoritmo de Momentum, *Stochastic Gradient Descent* (SGD) e *Root Mean Aquared Propagation* (RMSprop). Existem vários otimizadores e a escolha correta, de acordo com o modelo e seu objetivo, pode auxiliar na otimização das precisões. SGD é o método mais utilizado, nele os neurônios convergem e tendem em direção à função de custo ótimo. Momentum tenta resolver o problema de mínimo local adicionando um conceito temporal a ele. RMSprop, uma técnica de otimização baseada em gradiente, implementa uma média de decaimento exponencial dos gradientes, combinando o momento e outro algoritmo conhecido como *Adaptive Gradient Algorithm* (AdaGrad). Adam, por exemplo, é atualmente a opção mais usada, e sua popularidade se deve à sua capacidade de usar taxas de aprendizagem dinâmica e adaptativa (Osco et al., 2021a).

Os otimizadores combinados com a função de custo correta podem influenciar sua precisão. No contexto da otimização, a função definida para avaliar o modelo é conhecida como função de custo (também conhecida como função objetivo). Essa função representa a capacidade de o modelo representar os dados de treinamento em um único valor escalar. Com essa redução, o problema de aprendizado visa encontrar maneiras de ajustar os parâmetros do modelo para minimizar a função de custo. Isso permite que possíveis soluções sejam classificadas e depois comparadas entre as interações dos neurônios. As funções de custo são calculadas de acordo com probabilidades matemáticas e estão relacionadas à natureza do problema em si; ou seja, se a rede está lidando com um problema de classificação ou regressão. Para resolver classificações, também conhecidas como probabilísticas, pode-se usar funções como entropia cruzada, Poisson, entre outras. Para problemas relacionados à regressão, as perdas com base no erro quadrático médio (MSE), erro absoluto médio (MAE), erro percentual médio absoluto (MAPE), erro logarítmico quadrado médio (MSLE) etc. são comumente implementadas.

Várias arquiteturas foram propostas nos últimos anos para melhorar e otimizar DNNs, implementando diferentes tipos de camadas, otimizadores, funções de custo, nível de profundidade etc. Novos métodos para melhorar a performance de cada DNN incluem métodos para aumento de dados, auto-supervisão e estratégias de aprendizado não supervisionado, entre outros (Khan et al., 2020).

3 REDES NEURAIS CONVOLUCIONAIS E RECORRENTES

Uma DNN pode ser formada por diferentes arquiteturas, e a complexidade do modelo está relacionada à forma como cada camada e método computacional adicional é implementado. Diferentes arquiteturas de DL são propostas regularmente como redes neurais convolucionais (CNN), redes neurais recorrentes (RNN), redes de crenças profundas (DBN) e, mais recentemente, redes adversárias generativas (GAN). No entanto, as DNNs mais comuns nas categorias de redes supervisionadas são geralmente classificadas como CNNs e RNNs (Osco et al., 2021a).

Para tarefas de processamento de imagens e reconhecimento de objetos, a maioria das pesquisas atuais está focada em arquiteturas de CNNs. As CNNs são bem conhecidas na visão computacional, mas nunca receberam tanta atenção quanto hoje.

As CNNs são um tipo de arquitetura que é composta principalmente por três estruturas hierárquicas distintas, como camadas de convolução, camadas de agrupamento e camadas totalmente conectadas e têm muitos parâmetros, como pesos, vieses, número de camadas e neurônios, tamanho do filtro, passos, função de ativação, taxa de aprendizado etc. (Osco et al., 2021a). Em cada camada, a imagem de entrada é convolvida com um conjunto de núcleos (ou seja, filtros) e vieses adicionados, gerando mapas de feição. A operação de convolução considera a vizinhança dos pixels de entrada, portanto, diferentes níveis de correlação podem ser explorados de acordo com o tamanho dos filtros. As CNNs foram originalmente projetadas para processar dados na forma de várias matrizes, e essa característica é particularmente adequada para lidar com imagens multibandas, uma vez que os pixels são organizados regularmente. Como resultado, es-

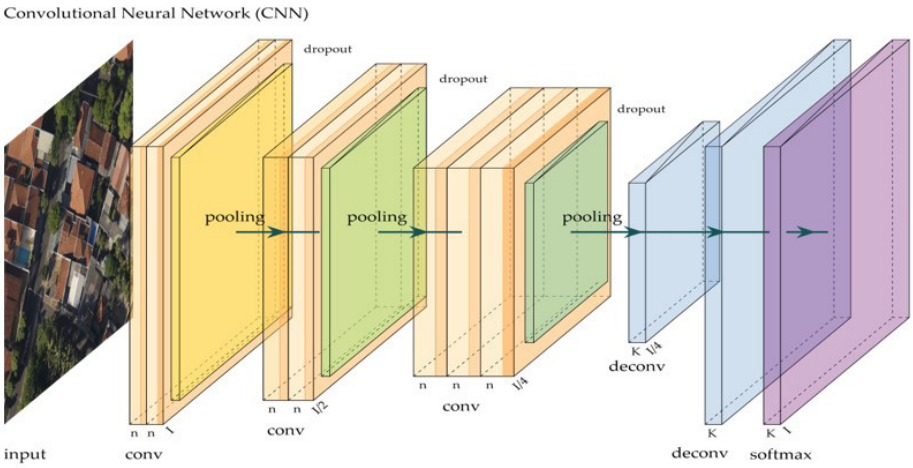


Figura 5. Uma CNN básica.
Fonte: Osco et al. (2021a).

sa arquitetura (Figura 5) está sendo considerada um dos modelos DNN mais populares hoje, e seu sucesso foi demonstrado em vários aplicativos de imagem baseados em VANTs (Osco et al., 2021a).

Como um tipo diferente de estrutura de rede de DL, as RNNs referem-se a outro modelo de aprendizagem supervisionada. Embora as RNNs tenham sido usados por um tempo em outras tarefas de visão computacional, só mais tarde foi proposto para ser usado com imagens. O modelo RNN foi originalmente desenvolvido para lidar com a análise de sequências discretas. A ideia principal por trás da implementação de RNNs diz respeito à sua capacidade de melhorar sua aprendizagem em porções repetitivas de um determinado fenômeno ou objeto, muitas vezes associadas a uma coleção de séries temporais. Um tipo de RNN que está sendo implementado atualmente em várias tarefas é a memória de longo curto prazo (LSTM). As LSTMs são uma escolha interessante para previsões relacionadas a séries temporais, pois resolvem o problema do gradiente descendente produzido nas RNNs originais. Para isso, eles usam componentes aditivos adicionais, permitindo que os gradientes fluam através da rede de forma mais eficiente. Uma unidade LSTM é normalmente composta de uma célula, bem como por portas de entrada, saída e esquecimento. À medida que a célula "lembra" valores de intervalos de tempo arbitrários, essas três portas regulam o fluxo de informações dentro e fora da célula (Osco et al., 2021a).

Alguns exemplos com dados de sensoriamento remoto demonstrando o potencial em que as RNNs estão sendo usadas são descritos por Osco et al. (2021a). Outros tipos de redes neurais, além de CNNs e RNNs, estão sendo propostos para também lidar com um tipo de imagem de dados. As GANs estão entre os modelos de DL não supervisionados mais inovadores. As GANs são compostas por duas redes: generativas e discriminativas, que disputam entre si. A rede generativa é responsável por extrair características de uma determinada distribuição de dados de interesse, como imagens, e a rede discriminativa distingue entre verdade real.

Recentemente, abordagens no contexto do processamento de imagens como a classificação de imagens de sensoriamento remoto (Lin et al., 2017) e a solução de problemas de interpretação imagem a imagem adotaram GANs como modelos de DL, obtendo resultados bem-sucedidos.

Em suma, várias DNNs são constantemente desenvolvidas, em plataformas científicas e/ou de competição de imagens, para superar os métodos existentes. No entanto, a cada ano que passa, algumas dessas redes neurais são frequentemente mencionadas, lembradas ou até melhoradas por novas abordagens. Um resumo dos modelos conhecidos de DL encontrados nos últimos anos é apresentado por Osco et al. (2021a) e representado na Figura 6. Embora possa parecer que a maioria dos métodos de DL foram desenvolvidos de 2015 a 2017, é importante notar que algumas novas redes profundas usam a maioria dos métodos já desenvolvidos como espinhas dorsais, ou acompanhados de outros tipos de arquitetura, usados principalmente como parte de extração de recursos de uma estrutura muito mais complexa. Muitas vezes, essas abordagens podem ser agrupadas em tarefas de classificação, como classificação em termos da cena, detecção de objetos, segmentação semântica e de instância (em termos de pixel) e tarefas de regressão.

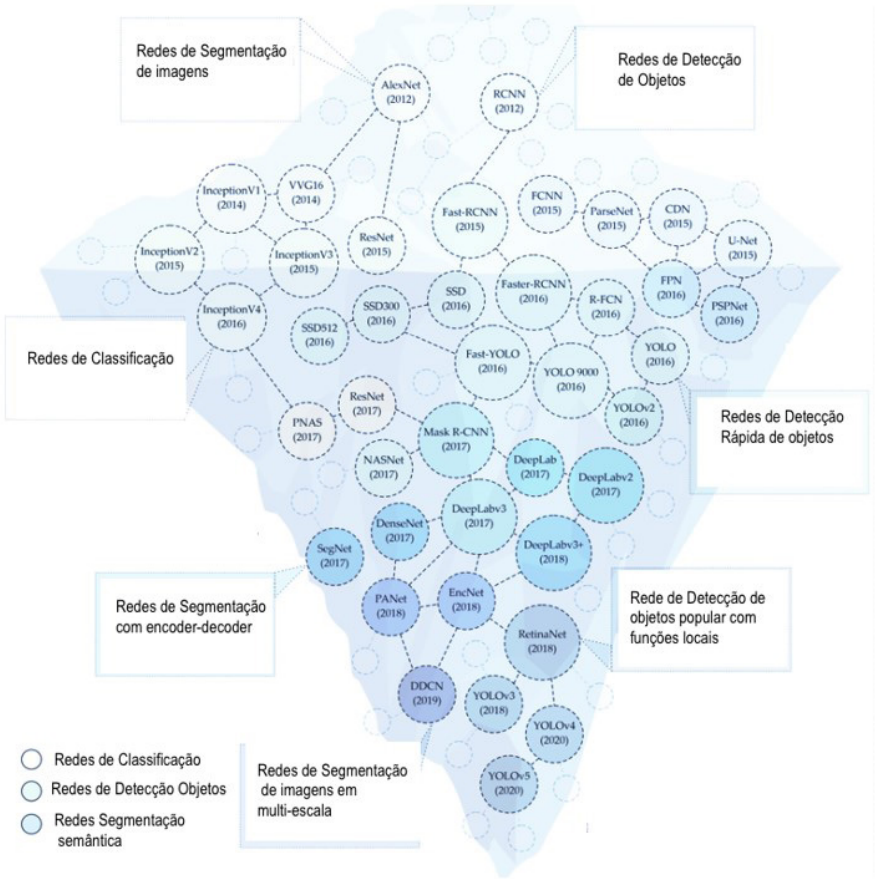


Figura 6. Uma série temporal de redes implementadas em DL indicando algumas arquiteturas populares na classificação de imagens, detecção de objetos e segmentação.
Fonte: adaptada de Osco et al. (2021a).

A classificação em termos da cena envolve a atribuição de um rótulo de classe a cada imagem (ou patch), enquanto a tarefa de detecção de objetos visa desenhar caixas delimitadoras em torno de objetos em uma imagem (ou patch) e rotular cada um deles de acordo com o rótulo de classe. A detecção de pontos pode ser considerada uma tarefa mais desafiadora, uma vez que requer a localização dos objetos na imagem e, em seguida, executar sua classificação. Uma outra maneira de detectar objetos em uma imagem, em vez de desenhar caixas delimitadoras, é desenhar regiões ou estruturas ao redor do limite dos objetos, ou seja, distinguir a classe do objeto no nível de pixel. Essa tarefa é conhecida como segmentação semântica. No entanto, na segmentação semântica não é possível distinguir vários objetos da mesma categoria, pois cada pixel recebe um rótulo de classe. Para superar essa desvantagem, uma tarefa que combina segmentação semântica e detecção de objetos chamada segmentação foi proposta para detectar vários objetos em máscara de nível de pixel e rotulando cada máscara em um rótulo de classe (Osco et al., 2021a).

Para aplicações na agricultura de precisão, a estratégia de usar redes bem conhecidas é, em geral, adotada. Não apenas VGG-16 e ResNet-50, mas também outras redes, incluindo AlexNet e VGG-11 têm sido usadas.

4 *DEEP LEARNING* EM AGRICULTURA DE PRECISÃO E DIGITAL

Uma das principais arquiteturas baseadas em DL utilizadas em aplicações de imageamento na agricultura foi descrita por Ma et al. (2019) e por Osco et al. (2021a).

Várias práticas agrícolas e ambientais podem, potencialmente, se beneficiar do uso de redes profundas como CNNs e RNNs. Por exemplo, monitoramento e contagem de animais, detectando e classificando vegetação, como pastagens e áreas densamente florestadas, assim como monitorando áreas agricultáveis diferenciando culturas e manejos, como também reconhecendo sinais de fogo e fumaça, analisando o uso da terra, a cobertura da terra e as mudanças de terreno, que são frequentemente implementadas em mode-

los de planejamento e tomada de decisão ambientais, prevendo e medindo riscos ambientais (Osco et al., 2021a), entre outros.

Nos últimos anos, os métodos de inteligência artificial, especialmente aqueles baseados em *deep learning*, foram adaptados para processar imagens em áreas agrícolas a partir de diferentes resoluções espaço-espectrais com o objetivo de atender áreas de aplicação distintas (Castro et al., 2020; Ramos et al., 2022). Métodos baseados em aprendizado profundo são de última geração e bem conhecidos por sua capacidade de lidar com tarefas desafiadoras e variadas, envolvendo tarefas de reconhecimento em cena, detecção de objetos e segmentação semântica (Osco et al., 2021b). Osco et al. (2021b) propuseram um método para detectar simultaneamente plantas e linhas de cultura no campo agrícola usando conjuntos de dados de imagens VANT através de algoritmos de aprendizagem profunda, visando alimentar sistema para detecção e monitoramento de pragas e doenças por planta.

Uma das abordagens mais comuns relacionadas com as aplicações de detecção remota diz respeito ao uso do solo e cobertura do solo, podendo ajudar nas ferramentas de gestão da propriedade. O uso de imagens hiperespectrais (Park; Song, 2020) em uma combinação entre camadas convolucionais 2D e 3D foi desenvolvido para determinar a cobertura do solo e áreas de parcelas cultivadas.

O mapeamento e monitoramento florestal baseado em VANT também é uma abordagem que vem ganhando a atenção na silvicultura de precisão. As áreas florestais muitas vezes apresentam dificuldades para o monitoramento e a investigação precisos, uma vez que podem ser de difícil acesso e ser perigosas, até certo ponto. Nesse aspecto, imagens tiradas de sensores embarcados em VANT podem ser usadas para identificar uma única espécie-árvore em ambientes florestais e compor um inventário (Nezami et al., 2020). Detecção de árvore única e classificação de espécies por CNNs também foram realizadas por Ferreira et al. (2020) em três tipos de palmeiras consideradas importantes para população e comunidades nativas da floresta Amazônica, mapeando-as com esse tipo de abordagem. Outro exemplo (Hu et al., 2020) inclui a implementação de uma rede adversária generativa convolucional profunda (DCGAN) para discriminar árvores de pinus saudáveis em uma área de parque florestal densa. Outra investigação recente (Miyoshi et al., 2020) propôs um novo método DL para identificar espécies de árvore única em áreas altamente densas com imagens hiperespectrais a partir de VANT.

Um estudo recente (Zhang et al., 2020) propôs um método baseado na segmentação semântica e na classificação de cena das plantas em imagens baseadas em VANT. O método baseia-se em uma CNN que classifica plantas individuais aumentando a escala de imagem enquanto integra recursos aprendidos em pequenas escalas. Essa abordagem é uma importante aplicação de fusão de dados multiescala. Também relacionadas à identificação da vegetação, várias arquiteturas de CNNs foram investigadas por Osco et al. (2021a) para imagens de VANT.

As aplicações em agricultura de precisão foram muito beneficiadas pela integração entre imagens obtidas com VANTs e métodos DL. A maioria das questões relacionadas a essas abordagens envolve detecção de objetos e extração de recursos para contagem de plantas e detecção de linhas de plantação, reconhecimento de lacunas de plantação, segmentação de espécies de plantas e espécies invasoras como plantas daninhas, fenologia e detecção de fenótipos, entre muitos outros aspectos.

Essas aplicações oferecem inúmeras possibilidades para esse tipo de mapeamento, especialmente porque a maioria dessas tarefas é, ainda, conduzida manualmente, por inspeção visual humana. Como resultado, podem ajudar nas práticas de agricultura de precisão, devolvendo previsões com resultados rápidos, imparciais e precisos, fundamentando a tomada de decisões para o gerenciamento de sistemas agrícolas.

Independentemente disso, embora os métodos automáticos forneçam informações importantes nesse contexto, eles enfrentam grandes desafios. Alguns deles incluem semelhança entre a planta desejada e as plantas invasoras, plantas difíceis de detectar em ambientes de alta densidade (ou seja, apresentando pequeno espaçamento entre plantas e linhas), linhas de plantação que não seguem um caminho reto, segmentação de borda no mapeamento de copas com conflito entre sombra e iluminação e muitos outros.

Ainda assim, novas investigações visam alcançar uma capacidade mais generativa para essas redes ao lidar com tais problemas. Nesse sentido, abordagens que implementam métodos em mais de uma condição ou plantio estão sendo o foco principal de trabalhos recentes, com diferentes tipos de plantações, sensores, altitudes de voo, ângulos, divergências espaciais e espectrais, datas, estádios fenológicos etc.

Em Apolo-Apolo et al. (2020) foi apresentada a produtividade pela contagem de frutos com o método baseado em CNN. A contagem de frutos não é algo inteiramente novo em abordagens baseadas em DL, alguns trabalhos demonstraram a eficácia dos métodos de caixas envolventes. A detecção de característi-

cas pontuais, além de várias diferenças em casos de oclusão, tamanho da fruta e problemas de iluminação na imagem são tratados nos trabalhos. As redes profundas de hoje demonstram alto potencial na previsão de produtividade. Uma delas inclui a previsão de pastagem com apenas imagens RGB (Castro et al., 2020). Outro exemplo interessante em estimativas de produtividade de culturas é apresentado por Nevavuori et al. (2020), em cujo trabalho uma CNN-LSTM foi usada para prever o rendimento com uma abordagem espaço-multitemporal. Embora utilizadas com menor frequência do que as CNNs, arquiteturas LSTM começam a ser utilizadas nas abordagens de agricultura de precisão a partir de informações temporais dessas áreas.

Em Osco et al. (2021b), métodos de segmentação semântica foram aplicados em dados multiespectrais baseados em VANT para extrair áreas de dossel, possibilitando descobrir estrategicamente quais regiões espectrais eram mais apropriadas. Uma aplicação recente com dados baseados em VANT também foi proposta por Osco et al. (2020a), em cujo trabalho um modelo CNN é apresentado para contar e detectar simultaneamente plantas e linhas de plantio. Esse modelo é baseado em uma extração de mapa de confiança e foi uma versão atualizada de pesquisas anteriores com contagem de árvores cítricas (Osco et al., 2020b).

Por fim, um campo ainda a ser explorado pela literatura é o de identificação e reconhecimento de pragas e doenças em plantas usando métodos baseados em DL. As abordagens mais recentes visavam identificar espécies invasoras. Dian Bah et al. (2018) avaliaram o desempenho de um método baseado em CNN para prever ervas daninhas nas linhas de plantio de diferentes culturas. A adaptação de domínio, na qual a rede extrai recursos de aprendizagem de novos dados não visualizados, é um dos modelos mais atuais (Li et al., 2020b). Quanto à detecção de doenças, um estudo (Kerkech et al., 2020) investigou o uso de segmentação de imagem para culturas de videira com imagens multiespectrais e foi capaz de separar sintomas visíveis (RGB), sintomas no NIR (infravermelho) e em uma interseção entre dados espectrais visíveis e infravermelhos. Outro exemplo interessante sobre a identificação de pragas com imagem de VANT foi apresentado por Tetila et al. (2020), que, considerando amostras de imagem de superpixel de várias espécies de pragas e usando filtros de ativação, reco-

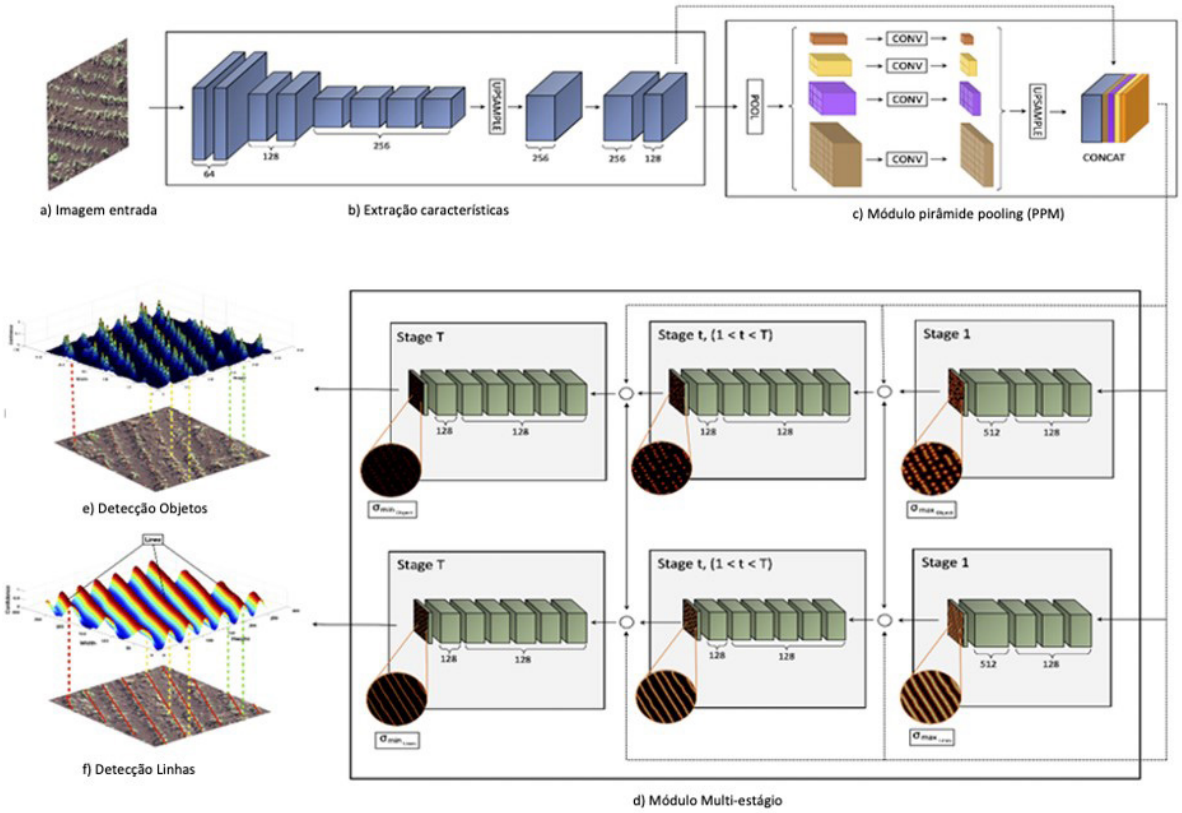


Figura 7. CNN proposta para detectar linhas de plantio e contar plantas: (a) imagem VANT de entrada; (b) o mapa de características obtido pela CNN; (c) o módulo de aprimoramento PPM com o mapa de características como uma entrada; (d) os dois ramos de detecção do MSM; (e) detecção de objetos (plantas); e (f) detecção de linhas (linhas de plantação).
Fonte: Osco et al. (2020a).

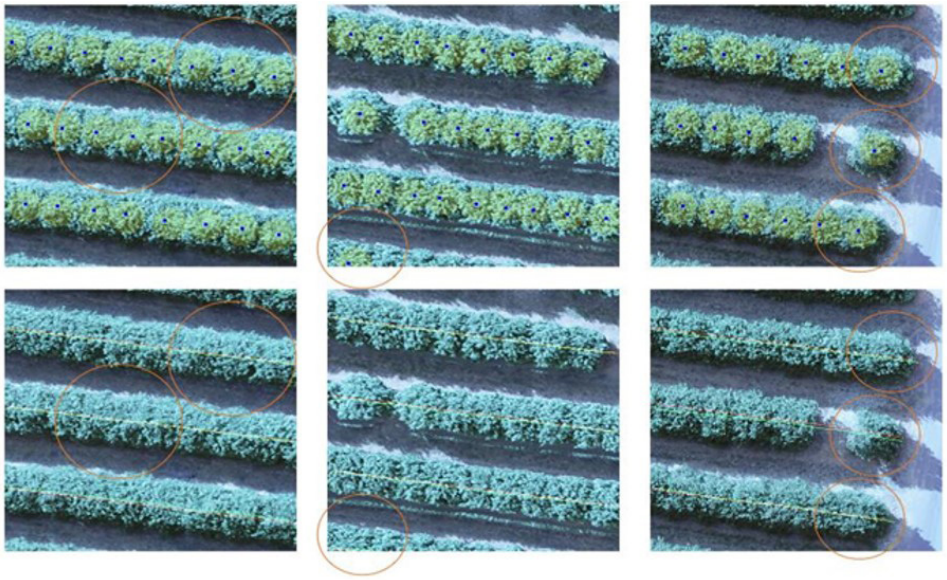


Figura 8. Exemplos de detecções de plantas e linhas de plantação no conjunto de dados de citros. As detecções de plantas e linhas de plantação são mostradas nas linhas superior e inferior da imagem, respectivamente. Os pontos azuis e os círculos amarelos representam uma previsão correta e as copas das árvores das plantas rotuladas. As linhas vermelha e verde representam as linhas de plantação anotadas e detectadas. Os círculos laranja destacam os desafios superados pela abordagem em cada cena.
Fonte: Osco et al. (2020a).

Figura 9. Contagem de plantas de citros com alta densidade.
Fonte: Osco et al. (2020a).

nheceram padrões visuais utilizando diferentes arquiteturas baseadas em DL.

Algumas aplicações podem ser visualizadas nas Figuras 7, 8 e 9. Na Figura 7 é apresentada a rede proposta por Osco et al. (2020a) para detectar linhas e plantas nas culturas agrícolas ao mesmo tempo. Um exemplo da detecção de linhas numa cultura de citros com alta densidade de plantas pode ser visto na Figura 8 e, na Figura 9, a detecção das plantas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas de IA tem avançado muito, principalmente o uso de *deep learning,* em aplicações na agricultura de precisão e na agricultura digital com grande destaque nos últimos anos. A aplicação para a área de imagens e fusão de dados, principalmente em séries temporais, tem se tornado de grande importância para aplicações na agricultura de precisão. Por ser uma área relativamente nova, este capítulo faz uma revisão

geral de técnicas e as perspectivas de última geração do uso de DL na agricultura de precisão e digital, sendo destaque nos avanços principalmente valendo-se de imagens de drones ou VANTs. A maioria das técnicas é baseada em métodos de detecção de objetos e sensores na faixa do visível (RGB); no entanto, algumas aplicações, como na agricultura de precisão e relacionadas a florestas, se beneficiam de dados multi/hiperespectrais e aparecem como promessas futuras. Embora as CNNs sejam as arquiteturas mais adotadas, outros métodos baseados em CNN-LSTMs e GANs estão ganhando atenção em aplicações de sensoriamento remoto e imagem na agricultura de precisão. As técnicas de DL estão em grande evolução e a cada dia aparecem novas propostas que se beneficiam do uso de GPUs e clusters de processamento e apresentam como grande tendência para processamento em tempo real usando sistemas embarcados em VANTs, robôs ou máquinas agrícolas.

REFERÊNCIAS

APOLO-APOLO, O. E.; MART´INEZ-GUANTER, J.; EGEA, G.; RAJA, P.; P´EREZ-RUIZ, M. Deep learning techniques for estimation of the yield and size of citrus fruits using a UAV. **European Journal of Agronomy**, v. *115*, p. 126030, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126030.

BISHOP, C. M. **Pattern recognition and machine learning**. Singapore: Springer Science+Business Media, 2006.

CASTRO, W.; JUNIOR, J. M.; POLIDORO, C.; OSCO, L. P.; GONÇALVES, W.; RODRIGUES, L.; SANTOS, M.; JANK, L.; BARRIOS, S.; VALLE, C.; SIMEÃO, R.; CARROMEU, C.; SILVEIRA, E.; JORGE, L. A. D. C.; MATSUBARA, E. Deep learning applied to phenotyping of biomass in forages with uav-based rgb imagery. **Sensors**, v. *20*, n. 17, p. 1-18, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/s20174802.

DIAN BAH, M.; HAFIANE, A.; CANALS, R. Deep learning with unsupervised data labeling for weed detection in line crops in UAV images. **Remote Sensing**, v. *10*, n. 11, p. 1-22, 2018. DOI: http://doi.org/10.3390/rs10111690.

FERREIRA, M. P.; ALMEIDA, D. R. A.; PAPA, D. D. A.; MINERVINO, J. B. S.; VERAS, H. F. P.; FORMIGHIERI, A.; SANTOS, C. A. N.; FERREIRA, M. A. D.; FIGUEIREDO, E. O.; FERREIRA, E. J. L. Individual tree detection and species classification of Amazonian palms using UAV images and deep learning. **Forest Ecology and Management**, v. *475*, p. 118397, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118397.

HU, G.; YIN, C.; WAN, M.; ZHANG, Y.; FANG, Y. Recognition of diseased Pinus trees in UAV images using deep learning and AdaBoost classifier. **Biosystems Engineering**, v. 194, p. 138-151, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.03.021.

KERKECH, M.; HAFIANE, A.; CANALS, R. Vine disease detection in UAV multispectral images using optimized image registration and deep learning segmentation approach. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *174*, p. 105446, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105446.

KHAN, A.; SOHAIL, A.; ZAHOORA, U.; QURESHI, A. S. 2020. A survey of the recent architectures of deep convolutional neural networks. **Artificial Intelligence Review**, v. 53, p. 5455-5516. DOI: https://doi.org/10.1007/s10462-020-09825-6.

LI, Y.; CAO, Z.; LU, H.; XU, W. Unsupervised domain adaptation for in-field cotton boll status identification. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *178*, p. 105745, 2020b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105745.

LIN, D.; FU, K.; WANG, Y.; XU, G.; SUN, X. Marta gans: Unsupervised representation learning for remote sensing image classification. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. *14*, n. 11, p. 2092-2096, 2017. DOI: http://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2752750.

MA, L.; LIU, Y.; ZHANG, X.; YE, Y.; YIN, G. Deep learning in remote sensing applications: a meta-analysis and review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 152, p. 166-177, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015.

MIYOSHI, G. T.; ARRUDA, M. D. S.; OSCO, L. P.; MARCATO JUNIOR, J.; GONÇALVES, D. N.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G.; HONKAVAARA, E.; GONÇALVES, W. N. A novel deep learning method to identify single tree species in uavbased hyperspectral images. **Remote Sensing**, v. *12*, n. 8, p. 1294, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/rs12081294.

NEVAVUORI, P.; NARRA, N.; LINNA, P.; LIPPING, T. Crop yield prediction using multitemporal UAV data and spatio-temporal deep learning models. **Remote Sensing**, v. *12*, n. 23, p. 1-18, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/rs12234000.

NEZAMI, S.; KHORAMSHAHI, E.; NEVALAINEN, O.; POLONEN, I.; HONKAVAARA, E. Ree species classification of drone hyperspectral and rgb imagery with deep learning convolutional neural networks. **Remote Sensing**, v. *12*, n. 7, p. 1070, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/rs12071070.

OSCO, L. P.; ARRUDA, M. S.; GONÇALVES, D. N.; DIAS, A.; BATISTOTI, J.; SOUZA, M.; GOMES, F. D. G.; RAMOS, A. P. M.; JORGE, L. A. C.; LIESENBERG, V.; LI, J.; MA, L.; JUNIOR, J. M.; GONÇALVES, W. N. A CNN approach to simultaneously count plants and detect plantation-rows from UAV imagery. **arXiv**, v. 2012.15827v3, p. 1-27, 2020a. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.15827.

OSCO, L. P.; ARRUDA, M. D. S.; MARCATO JUNIOR, J.; SILVA, N. B.; RAMOS, A. P. M.; MORYIA, E. A. S.; IMAI, N. N.; PEREIRA, D. R.; CRESTE, J. E.; MATSUBARA, E. T.; LI, J., GONÇALVES, W. N. A convolutional neural network approach for counting and geolocating citrus-trees in UAV multispectral imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry**

and Remote Sensing, v. *160*, p. 97-106, 2020b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.12.010.

OSCO, L. P.; MARCATO JUNIOR, J.; RAMOS, A. P. M.; JORGE, L. A. C.; SILVA, J. A.; MATSUBARA, E. T.; PISTORI, H.; GONCALVES, W. N.; LI, J. A review on deep learning in UAV remote sensing. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. *102*, p. 102456, 2021a. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102456.

OSCO, L. P.; NOGUEIRA, K.; RAMOS, A. P. M.; PINHEIRO, M. M. F.; FURUYA, D. E. G.; GONÇALVES, W. N.; JORGE, L. A. C.; MARCATO JUNIOR, J.; SANTOS, J. A. Semantic segmentation of citrus-orchard using deep neural networks and multispectral uav-based imagery. **Precision Agriculture**, v. *22*, n. 4, p. 1171-1188, 2021b. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-020-09777-5.

PARK, S.; SONG, A. Discrepancy analysis for detecting candidate parcels requiring update of land category in cadastral map using hyperspectral uav images: a case study in jeonju, south korea. **Remote Sensing (Basel)**, v. *12*, n. 3, p. 354, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/rs12030354.

RAMOS, A. M. M.; GOMES, F. D. G.; PINHEIRO, M. M. F.; FURUYA, D. E. G.; GONÇALVEZ, W. N.; MARCATO JUNIOR, J.; MICHEREFF, M. F. F.; BLASSIOLI-MORAES, M. C.; BORGES, M.; LAUMANN, R. A.; LIESENBERG, V.; JORGE, L. A. C.; OSCO, L. P. Detecting the attack of the fall armyworm (Spodoptera frugiperda) in cotton plants with machine learning and spectral measurements. **Precision Agriculture**, v. *23*, p. 470-491, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s11119-021-09845-4.

RUSSEL, S.; NORVIG, P. **Artificial intelligence:** *a modern approach.* 4th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2020.

TETILA, E. C.; MACHADO, B. B.; MENEZES, G. K.; OLIVEIRA, A. S.; ALVAREZ, M.; AMORIM, W. P.; BELETE, N. A. S.; SILVA, G. G.; PISTORI, H. Automatic recognition of soybean leaf diseases using UAV images and deep convolutional neural networks. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. *17*, n. 5, p. 903-907, 2020. DOI: http://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2932385.

ZHANG, C.; ATKINSON, P. M.; GEORGE, C.; WEN, Z.; DIAZGRANADOS, M.; GERARD, F. Identifying and mapping individual plants in a highly diverse high-elevation ecosystem using UAV imagery and deep learning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. *169*, p. 280-291, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.09.025.

A agricultura de precisão, a engenharia de precisão e a eletrônica embarcada

4

Precision agriculture, precision engineering and embedded electronic

Ricardo Yassushi Inamasu[1], Rafael Vieira de Sousa[2]

[1] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, ricardo.inamasu@embrapa.br*
[2] *Professor, Universidade de São Paulo (USP), Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA), Pirassununga (SP), Brasil, rafael.sousa@usp.br*

RESUMO

Na agricultura de precisão, o emprego de elementos eletrônicos, como receptores GNSS e computadores de bordo nas máquinas e equipamentos agrícolas, sempre chamou muita atenção. Possibilitou ao agricultor enxergar a variabilidade no campo na forma de mapas, acelerando o processo de gestão do campo baseado em dados colhidos por sensores e imagens digitais. O texto faz uma breve passagem pelo contexto da engenharia de precisão como referência ao processo que convergiu as tecnologias das engenharias eletrônica, mecânica e computacional, e que trouxe a necessidade de interconectividade e compatibilidade, resultando em um padrão de conexão. Assim, o padrão de comunicação entre tratores e implementos NBR ISO 11783 é abordado como o corpo da eletrônica embarcada em que as informações e os dados das máquinas fluem para troca de informações. É discutida a estrutura do padrão, bem como o seu potencial futuro.

Palavras-chave: agricultura de precisão; ISOBUS; eletrônica embarcada; Brasil.

ABSTRACT

In precision agriculture, the use of electronic elements such as GNSS receivers and on-board computers in agricultural machinery and equipment has always attracted a lot of attention. It has enabled the farmer to see the variability in the field in the form of maps, accelerating the field management process based on data collected by sensors and digital images. The text makes a brief passage through the context of precision engineering as a reference to the process that converged the technologies of electronic, mechanical, and computer engineering and brought the need for interconnectivity and compatibility resulting in a connection pattern. Thus, the NBR ISO 11783 tractor-implement communication standard is approached as the body of on-board electronics where information and data from machines flow to exchange information. The structure of the pattern and its future potential are discussed.

Keywords: precision agriculture; ISOBUS; embedded electronics; Brazil.

1 INTRODUÇÃO

Em 2018, a Sociedade Internacional de Agricultura de Precisão (ISPA) consolidou a definição de Agricultura de Precisão (AP) após passar por consultas e discussões com participação de especialistas que construíram o que seria a AP de hoje de forma global. Não é, portanto, a finalidade deste texto discutir o papel da eletrônica embarcada e o que se trata nessa área, mas sim a influência que a engenharia de precisão teve na construção da agricultura de precisão. Evans (2012), em poucas páginas, apresenta uma revisão sobre a engenharia de precisão descrevendo como a convergência de conhecimentos impulsionou o desenvolvimento das tecnologias em resposta às demandas de inovação da sociedade em vários períodos, citando exemplos a partir de sistemas ópticos de 1648 até os de hoje. O termo *precisão*, ao atuar em sistemas de alto desempenho, parece que entregou à engenharia *status* de sofisticação. Entre as décadas de 1980 e 1990, quando o termo precisão foi agregado à agricultura, provavelmente houve a intenção de trazer parte do conceito da convergência das tecnologias e não apenas a

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000088

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

sua acepção lexicográfica. Essa forma de apropriar os conceitos do lado tecnológico não é apenas na agricultura, mas também em outras áreas, como a medicina (ver "medicina de precisão"). Talvez, por essa razão, o termo tenha sido adotado e ainda gere muitas discussões aos que se iniciam nessa temática, indagando se a palavra *precisão* é a mais adequada.

Na década de 1980, as inovações foram introduzidas principalmente por meio da integração das engenharias, como as engenharias mecânica, eletrônica, computacional e a nascente engenharia de *software*, percebidas pela sociedade por meio de máquinas programáveis (CNC), robôs industriais, veículos (injeção eletrônica), impressoras, entre outros. Provavelmente, uma das melhores características que a engenharia de precisão fez destacar é a abordagem sistêmica do problema e, pela competência de integrar múltiplas disciplinas e especialidades, alcançar um produto equilibrado e eficiente, o que se resume na capacidade e na técnica de gerir projetos inovadores multidisciplinares. A intensa integração gerou áreas de novos conhecimentos tecnológicos, como a engenharia mecatrônica. Foi ainda nessa década que o sinal do GPS ficou disponível, o que possibilitou o desenvolvimento de sistemas de monitoramento e registro da localização (coordenada geográfica) de pessoas, máquinas e veículos. O vibrante ecossistema de inovação dos EUA, da Europa e do Japão favoreceu o desenvolvimento de máquinas agrícolas. A agricultura de precisão se desenvolvia paralelamente. Em 1992, a Ag Leader introduziu no mercado o monitor de produtividade em colhedora de grãos (Franzen; Mulla, 2016; Stone et al., 2008), ilustrado na Figura 1. O Norte Global, onde havia processo de produção agrícola já madura, buscava tratar a variabilidade espacial demandando máquinas. No Brasil, porém, as demandas dos agricultores eram outras. Estávamos saindo de um país importador de alimentos para exportador de commodities agrícolas. O Cerrado brasileiro estava se abrindo para uma agricultura pujante e o desafio era produzir nas condições do trópico.

No Brasil, houve iniciativas para embarcar nesse bonde do desenvolvimento tecnológico da década de 1980. Com intuito de criar competência nacional em microeletrônica, arquiteturas de *hardware* e *softwares* básicos, as importações com esses itens tecnológicos foram restringidas como forma de proteção do mercado (Lei Federal nº 7.232/84). Houve esforços nas universidades e empresas. A Escola Politécnica da USP implantou um dos primeiros cursos de graduação em engenharia mecatrônica ainda no final da década de 1980 e nesse curso elenca a disciplina de engenharia de precisão, o que assegurou a disseminação de seus conceitos e técnicas de projeto. Porém, a indústria brasileira não conseguiu aproveitar as competências e as respostas às expectativas locais foram limitadas. Um dos poucos resultados nesse período foi um protótipo de um coletor de dados, ilustrado na Figura 2, para medir desempenho de trator em 1992, introduzido no mercado pela *startup* Enalta (São Carlos-SP), a qual, em 2013, foi considerada uma das 50 empresas mais inovadoras no mundo pela revista norte-americana *Fast Company*.

Na década de 1990, abriu-se o mercado para importação. Era possível importar produtos com microeletrônica, inclusive os embarcados em veículos, como a injeção eletrônica de combustível em motores. Na segunda metade dessa década, estavam disponíveis no mercado nacional máquinas agrícolas com a eletrônica embarcada concebida notadamente na Europa e nos EUA (Stone; Benneweis; Bergeij, 2008). Começa então a Agricultura de Precisão no Brasil como a que

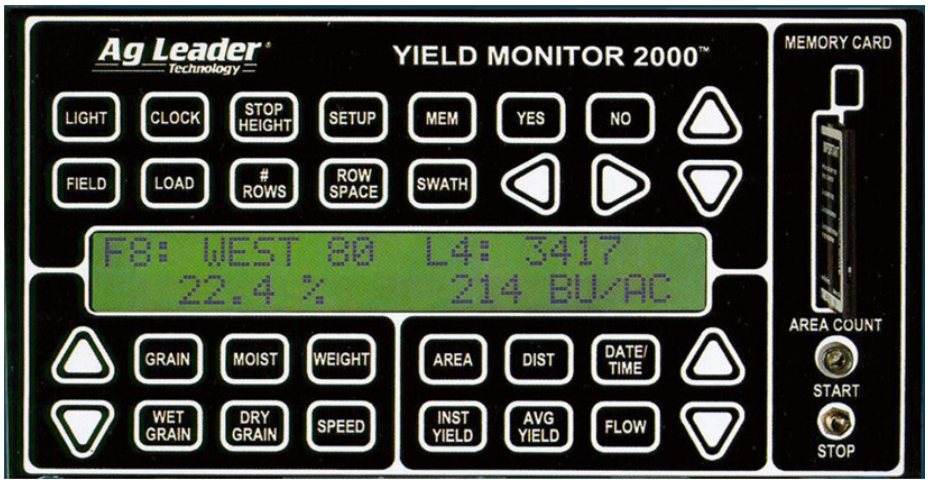


Figura 1. Primeiro monitor de produtividade lançado pela Ag Leader em 1992 (Imagem consultada em https://www.agleader.com/our-history/?locale=pt#! Em 05 jul 2022).

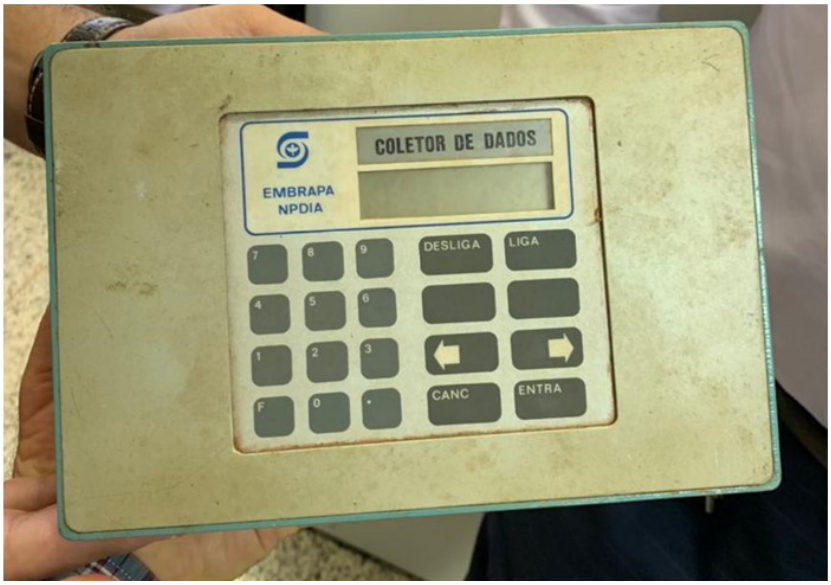


Figura 2. Protótipo de coletor de dados brasileiro para medir desempenho de tratores e implementos construído pela Embrapa em 1991 e lançado no mercado pela *startup* Enalta.

conhecemos hoje. O esforço da engenharia de precisão no Brasil ainda continuou absorvendo tecnologias que eram novas no mercado nacional. Parece que houve uma forte sinergia entre a agricultura de precisão e os esforços da engenharia de precisão, a ponto de ser difícil a distinção entre as duas.

Os agricultores perguntavam se as – ainda caras – máquinas para agricultura de precisão entregavam retorno econômico. A Embrapa tentou buscar essa resposta até entender que essa pergunta não era a adequada para a responder à inquietação dos que questionavam. A pergunta correta era se a propriedade tem variabilidade espacial suficiente para que o investimento em máquinas possa entregar o retorno econômico, o que resultou no primeiro volume dessa série (Inamasu et al., 2011).

Quanto à engenharia de precisão, apesar de o conceito ter nascido na busca pela perfeição das dimensões e pelo aperfeiçoamento da manufatura, a sua propriedade integradora da engenharia em uma visão sistêmica continua sendo demandada para viabilizar as operações de AP e aumentar a produtividade, aprimorando operações de campo, como o plantio e a aplicação mais eficiente de insumos.

Talvez a limitação – se podemos dizer que haveria um limite para a engenharia de precisão – seja a forte característica determinística muitas vezes considerada como qualidade (Evans, 2012; Bryan, 1984). Essa característica torna a agricultura e a pecuária de difícil assimilação pela engenharia de precisão, devido ao fato de esses setores processarem e produzirem um produto vivo – muito diferente de um produto da manufatura, que é inanimado – em um ambiente incontrolável, com alto grau de incertezas, com incontáveis parâmetros químicos, físicos (água, solo e clima) e biológicos (micro e macro-organismos), que se interagem de forma complexa.

A indústria tradicional de máquinas agrícolas tem a sua origem na arte de transformação do ferro para lavra. As empresas evoluíram absorvendo a engenharia mecânica e a agrícola, mas poucos fabricantes investiram na criação de setores que possibilitassem a integração da eletrônica. Atualmente, não há como não evoluir sem essa transformação, para assim se inserirem na era digital. Na feira Agritechnica 2011, em Hannover, Alemanha, a NH já apresentava um protótipo de trator com célula de hidrogênio. Hoje, a SAE discute combustíveis alternativos. Com o valor inusitado do litro de diesel mais alto do que o litro da gasolina, em um determinado momento, muito provavelmente o etanol e a célula de hidrogênio podem ser uma alternativa que a engenharia deverá solucionar. O futuro é ainda incerto, mas é fato que os implementos estão cada vez mais eletrificados, substituindo as transmissões mecânicas. A interface de potência elétrica de alta tensão para implemento agrícola está padronizada pela norma ISO 23316 para viabilizar a utilização de elementos atuadores eletromecânicos para aplicações agrícolas diversas. Elementos de robótica já estão presentes em tratores comerciais através de sistemas autônomos, como em pilotos automáticos e sistemas de visão de máquina utilizados para navegação autônoma e operações, como semeadura, pulverização e colheita. Além da automatização e da robotização das máquinas e implementos, caminha junto a utilização de sistemas de telemetria que permitem a

comunicação remota sem fio com frota de máquinas para acompanhar seus *status* de operação em tempo real, em centrais de controle de operação (telas e terminais em salas de controle). Há um ponto crucial que viabiliza esse avanço que é a conectividade. Nesse contexto, a eletrônica, os dados e as informações devem estar disponíveis de forma prática tanto entre os elementos de automação dentro da máquina como para sistemas externos. O ponto de partida para ter tal recurso é a padronização da comunicação entre máquinas, implementos e seus subsistemas componentes.

2 ISOBUS – PADRÃO ISO DE COMUNICAÇÃO ENTRE TRATOR E IMPLEMENTOS

O ISOBUS é o nome comercial para tecnologias que utilizam o padrão internacional para a comunicação entre trator e implementos normalizado pela ISO sob número 11783 ou, mais especificamente, entre subsistemas do trator com subsistemas de um implemento conectado. No Brasil, a discussão como norma brasileira (NBR ISO 11783) foi iniciada na ABNT com apoio de empresas, reativando uma Comissão de Estudo no dia 15 de agosto de 2005, atual Comissão de Estudo de Comunicação e Eletrônica Embarcada - CE-203:019.002, sob o Comitê Brasileiro de Tratores, Máquinas Agrícolas e Florestais.

A história do ISOBUS foi contada em vários momentos e houve muitos que atuaram na construção do que o padrão é atualmente, mas talvez a mais recente e interessante seja a de Oksanen e Auernhammer (2021), por fazerem parte dos atores que participaram desde o início e terem acompanhado as várias etapas do seu desenvolvimento. A história talvez não seja de interesse dos que querem entender e obter o domínio tácito para desenvolver um produto compatível, mas, como a norma ISO 11783 foi construída associando e compatibilizando diferentes padrões desenvolvidos por instituições distintas, o entendimento da história da construção e implantação comercial da norma pode ajudar a compreender melhor os pontos críticos das 14 partes componentes da mesma. Essas 14 partes que compõem a norma não necessariamente apresentam uma lógica de concepção de baixo para cima, da camada física para a camada de aplicação, como proposta pelo modelo referência de Interconexão de Sistemas Abertos ou Modelo OSI (*Open System Interconnection*), que possui orientações distribuídas em sete camadas para construção de um padrão de rede de comunicação de dados.

Aos usuários de máquinas, o objetivo do padrão é ser "conecte e use" (*plug and play*) e, portanto, não demandar o conhecimento do funcionamento interno, nem de redes embarcadas de computadores e sistemas monitores de baixo nível. De certa forma, o padrão cumpre o objetivo inicial, mas, devido a algumas particularidades, ainda há desafios para os desenvolvedores para se alcançar um sistema completamente *plug and play*. Para atenuar a dificuldade, houve um esforço para criar uma estrutura com classes de compatibilidades. Essa estrutura de classificação com todos os modelos compatíveis foi construída pela associação internacional AEF (*Agricultural Industry Electronics Foundation*), inclusive o seu processo de certificação e uma lista de produtos que é atualizada constantemente. A lista de máquinas compatíveis pode ser consultada por fabricantes, representantes comerciais e produtores, e permite conferir o nível de compatibilidade em sítio de Internet da AEF (veja https://www.aef-online.org/products/aef-isobus-database.html#/Howitworks, consultado em 24 de outubro de 2022).

Ainda há pouca inserção de produtos disponíveis no mercado brasileiro no banco de dados da AEF, pois muitos dos equipamentos ainda são importados ou são componentes de máquinas agrícolas (tratores, implementos ou colhedoras), que contêm tais equipamentos importados e montados no País. Entretanto, as características regionais da agricultura do Brasil geram oportunidades para o setor agrícola nacional em virtude da demanda, para que os fabricantes de implemento busquem adaptar e ofertar produtos adequados à norma ISO 11783.

3 ISOBUS – COMO ENTENDER AS SUAS PARTES PARA IMPLEMENTAÇÃO

Todos os caminhos para implementação do ISOBUS em equipamentos passam pelo entendimento da estrutura da norma ISO 11783; portanto, é o ponto de partida para o desenvolvimento de qualquer sistema que pretenda ser compatível com esse padrão. Provavelmente, no futuro, surgirá no mercado um sistema de desenvolvimento que possibilite a abstração da estrutura embarcada nesse sistema, porém, atualmente, o processo ainda deve ser iniciado por meio da compreensão da estrutura da norma, mesmo utilizando as bibliotecas de programa, como, por exemplo, a biblioteca ISOAgLib mantida pela empresa OSB AG de Munique. O entendimento da origem das partes dos protocolos (atualmente composta de 14 partes) e suas respectivas funções explica a sua composição e fundamenta a compreensão. O padrão ISO 11783 possui partes baseadas nos padrões SAE J1939 e DIN 9684, publicados em meados da década de 1990. A DIN 9684 foi editada pela associação de normas alemã *Deutsches Institut für Normung*

ou simplesmente DIN, na década de 1980. A norma SAE J1939 foi editada pela norte-americana *Society of Automotive Engineers* ou SAE, na década de 1990, para integrar comandos de motores e transmissão, ou seja, trem de potência ou *powertrain*. O protocolo SAE J 1939 padroniza a comunicação entre as Unidades de Controle Eletrônico (ECU – *Electronic Control Unit*) de caminhões e máquinas para construção, definindo protocolos da camada enlace de dados e de gerenciamento de rede, que foram adaptadas e incorporadas à ISO 11783. Já a DIN 9684 define um padrão com diversas camadas de protocolos definidas especificamente para máquinas e implementos agrícolas. A ISO 11783 adaptou e incorporou protocolos da DIN 9684 relacionados principalmente com a operação do Terminal Virtual ou Terminal Universal, que é a ECU com funções de interface homem-máquina (IHM), e que viabiliza a identificação, a configuração e o monitoramento do implemento e de suas funções através de um terminal no trator. Por ser adaptação de duas concepções, é necessário entender as duas normas e como as duas foram acomodadas para que a estrutura e as soluções adotadas na ISO 11783 comecem a fazer sentido. Com o domínio conceitual da estrutura e as inter-relações das 14 partes da ISO 11783, estabelece-se a base de conhecimento para o desenvolvimento de um produto ISOBUS compatível. Ou seja, o entendimento da estrutura é uma condição *sine qua non* para seguir os próximos passos de desenvolvimento.

Cada uma das 14 partes foi desenvolvida por um grupo de trabalho formado dentro da ISO. Algumas partes são adaptações ou ajustes de normas existentes, mas grande parte da norma descreve protocolos originais e particulares da própria norma. As 14 partes da norma ISO 11783 estão descritos na Tabela 1, com as versões do ano de publicação tanto da ABNT como da ISO, seus números de páginas e custos de julho de 2022. Observa-se que, nessa data, praticamente todas as normas estão atualizadas exceto a Parte 13 "Servidor de arquivos", a qual, em breve, a ABNT deverá atualizar.

A Parte 1 traz a lista de siglas e dicionários de termos utilizados em todas as partes. Muitos desses termos fazem sentido apenas em contextos específicos. Por exemplo, termo como "endereço" deve ser compreensível e sem duplo sentido, pois este leva o leitor/

Tabela 1. Versão espelho ABNT NBR ISO e a versão original em inglês da norma ISO 11783, custo e número de páginas (consulta realizada em dezembro de 2022).

Item	Parte	Versão (ano da publicação)		Preço da Norma		Número de Páginas	
		ABNT NBR	ISO	ABNT NBR (Reais)	ISO (Francos Suíços)	ABNT NBR	ISO original em inglês
1	Padrão geral para comunicação de dados móveis.	2019	2017	151,00	118	26	19
2	Camada física.	2021	2019	271,90	178	71	66
3	Camada de enlace de dados.	2021	2018	271,90	178	72	62
4	Camada de rede.	2017	2011	186,40	138	40	32
5	Gerenciamento de rede.	2021	2019	186,40	138	36	30
6	Terminal virtual.	2021	2018	766,20	198	434	348
7	Camada de aplicação de mensagens do implemento.	2020	2015	537,00	198	213	185
8	Mensagens do trem de força.	2011	2006	38,80	38	3	3
9	ECU (Unidade de Controle Eletrônico) do trator.	2017	2012	132,00	88	19	17
10	Controlador de tarefas e intercâmbio de dados do sistema de informações de gestão.	2018	2015	594,00	198	248	205
11	Dicionário de elementos de dados móveis.	2012	2011	38,80	38	3	3
12	Serviços de diagnóstico.	2021	2019	178,50	138	33	31
13	Servidor de arquivos.	2015	2022	230,30	158	52	60
14	Controle sequencial.	2015	2013	271,90	178	72	65

projetista a acessar o elemento específico que participa da rede de comunicação e está presente em todas as partes da norma. Um outro exemplo muito claro é o termo "máquina", que é muito comum, no mundo computacional, referir-se a um computador ou a um conjunto de processos computacionais que executa uma tarefa, porém, evidentemente, há a máquina agrícola propriamente dita. O dicionário também deixa clara a diferença, já que muitas vezes o termo é utilizado sem muita distinção, como entre os termos "Terminal Virtual" e "Terminal Universal". Apesar de, para um leitor atento, na maioria dos casos apresentar possibilidade de extrair o significado do contexto, um dicionário é uma parte importante para evitar o uso de termos de forma incorreta dentro do contexto de uma norma tão ampla. Observa-se, pois, que é incomum encontrar um documento escrito por equipes com diferenças tão distintas na origem de áreas acadêmicas e que, consequentemente, apresentam um costume de uso de linguagem diferente. É importante ter essa parte como um documento de consulta para estudar a ISO 11783.

As Partes 2 a 5 compreendem a tecnologia da rede digital ou rede de computadores, constituída por elementos físicos e lógicos que compõem os meios e as formas de comunicação entre os nós componentes da rede. Essas partes correspondem às camadas 1 a 4 do Modelo OSI. Apesar de atualmente as redes de computadores fazerem parte do dia a dia da grande maioria, nem todas as camadas são facilmente visualizadas. Para um usuário de máquinas agrícolas, não tem a menor necessidade de entender o funcionamento dessas camadas, entretanto, para o projetista de um dispositivo ISOBUS com pretensão de se conectar e trocar dados e informações na rede, torna-se fundamental. A ideia de camadas é para que os níveis superiores recebam os dados independentemente da organização dos níveis inferiores implementados. Internamente, em cada camada, existem códigos que implementam os protocolos correspondentes às funções da camada, interagindo somente com a camada inferior, e que também possuem funções para serem utilizadas de modo transparente pela camada superior.

A camada mais inferior é descrita como "física" e é abordada na Parte 2 da ISO 11783. Essa camada descreve o meio físico de comunicação, no caso, cabos, conectores, pinos dos conectores, valores elétricos (tensão, corrente e impedância), taxa de transmissão de dados, entre outros, que permitem que sinais elétricos sejam enviados por um nó da rede e cheguem aos demais nós ou ECU. Esse meio de comunicação com suas características próprias, que conectam os nós, é chamado de barramento A camada física poderia ter utilizado outro meio de transmissão, como rádio ou fibra ótica, mas houve preferência por um protocolo CAN (*Controller Area Network*), muito provavelmente por ser o mais apropriado para aplicação em sistemas embarcados em veículos da época. Ainda hoje, não há no mercado um protocolo suficientemente mais robusto para assegurar a comunicação livre de falhas entre os nós em veículos, o que faz com que elementos compatíveis ganhem ainda escala de produção. Observa-se que o protocolo CAN está normalizado na ISO 11898, entretanto há algumas particularidades que justificam um documento específico para ISO 11783. A especificação da característica básica da camada física do ISOBUS para a taxa de transferência é de 250 kbit/s, o que limita o comprimento máximo do barramento para 40 m e com a recomendação de, no máximo, 30 ECU conectadas. Essa especificação parece, até o momento, ser suficiente para acomodar as necessidades de ECU em tratores e implementos conectados que tenham funções com papel crítico de controle e troca de dados em tempo real, e cuja falha não seria tolerável. É possível ampliar a distância e o número de ECU conectadas através da utilização de sub-redes ou barramentos diferentes interligados por ECU com características próprias e definidas na Parte 4. A taxa de transferência é limitante para transferência de dados volumosos, como, por exemplo, vídeo-imagens. Nesse caso, equipamentos de vídeo com função de monitoramento e retorno ao operador demandam a instalação de meio de comunicação próprio de modo que os quadros de imagens não interfiram no desempenho do barramento. Por outro lado, em equipamentos que enviam uma quantidade elevada de dados, como no caso de sensor de três dimensões (3D) por escaneamento a laser, utilizado na detecção de obstáculos, devem ser pré-processados para que apenas dados críticos trafeguem no barramento ISOBUS.

A Parte 3 é denominada "Camada de enlace de dados" e define a estrutura que empacota os dados e comandos para que esta trafegue no barramento. Pode ser entendida como a parte que define um pacote mínimo para entrega de dados ou comandos, análogo a uma correspondência entregue pelo serviço de correspondência que depende de uma série de regras que viabilizam sua entrega. Assim, como um pacote de correio, o pacote de dados deve ter um campo para descrever os dados do destinatário e do remetente, sendo que essa parte define o "formato do envelope", incluindo "carimbo" para mensagens urgentes ou mensagem "para todos". Na medida em que o barramento é digital, a "correspondência" não deixa de ser

uma sequência de bits e bytes. A ISO 11783 denomina esse pacote de Unidade de Dados de Protocolo ou, em inglês, *Protocol Data Unit* ou simplesmente PDU.

A Parte 4, "Camada de rede", define a topologia da rede de dados e como a rede pode ser configurada. Nesse ponto, é importante entender que o ISOBUS foi um protocolo escrito por vários fabricantes, com seus próprios protocolos, que se reuniram para fazer com que os seus equipamentos pudessem conversar um com outro por meio de compatibilização de seus protocolos. Nessa parte, os fabricantes buscaram integrar e compatibilizar as suas topologias já adotadas por meio de unidades de controles especiais, que foram chamadas de Unidade de Conexão de Rede ou NIU (do inglês *Network Interconnection Unit*), o que viabilizou a integração de diferentes sub-redes, definindo o barramento do implemento e o barramento do trator. A NIU que conecta o barramento do trator e do implemento faz parte do ISOBUS (não é opcional) chamado de ECU do Trator e está detalhado na Parte 9 da norma.

A Parte 5, "Gerenciamento de rede", traz as regras para que todos os nós (ECU) possam entrar na rede e comunicar-se um com outro. Para que isso seja possível, regras de endereçamento são definidas por essa parte da norma. Em redes, a regra de endereçamento define como um endereço deve ser configurado para que possa participar da troca de mensagens sem que haja "desentendimentos". Caso ocorra algo conflituoso, essa parte define as regras e os procedimentos para que a rede não pare e resolva o conflito, ou notifique o operador.

Uma ECU atendendo às Partes 2 a 5 será então capaz de não apenas ler os dados que trafegam na rede, mas também inserir dados e comandos na rede para os demais nós, sem o perigo de causar uma queda no sistema. Entretanto, para uma interação plena, por exemplo, solicitar algum tipo de serviço da ECU do Trator e ser atendido corretamente, é necessário utilizar comandos e dados que estejam implementados na Parte 9 e assim por diante, descritas nas demais partes da ISO 11783.

A Parte 6, denominada "Terminal virtual", tem a sua base na DIN e descreve as regras para interagir digitalmente por meio do barramento do implemento como a interface homem-máquina (display gráfico), que também é chamado de Terminal Universal (UT – *Universal Terminal*) e está posicionado na cabine do trator. São poucas as partes físicas que o operador da máquina agrícola interage efetivamente com o ISOBUS. O terminal é uma delas. As demais partes são os conectores que estão descritos na Parte 2. Atualmente, os celulares têm telas gráficas e os mais simples possuem 128 × 720 pixels, chegando a 1644 × 3840 pixels. As telas dos UTs são definidas no formato quadrado ou retangular e partem de uma resolução de 200 × 200 pixels. Apesar de existirem, nos dias de hoje, telas com muito maior resolução, pelo fato de essa tela ter essa especificação aparentemente obsoleta, o ISO 11783 garante que um implemento possa ser operado com compatibilidade mesmo com os tratores com ISOBUS ainda nas primeiras versões. A diferença com um simples monitor é a capacidade de a UT ser programada para interagir com uma ECU. O desenvolvedor de uma ECU de um implemento deve dominar os comandos e as propriedades da UT para que a sua programação permita que o operador do trator possa "conversar" com o implemento por meio de "botões", textos e imagens. A Parte 6 é a parte com maior número de páginas (434 páginas na versão ABNT NBR e 348 páginas na versão original em inglês). É importante salientar que o VT, sendo um padrão, pode ser trocado com terminais de maior capacidade de processamento, mostrando a vantagem da padronização, que vai além da facilidade de conectar máquinas de diferentes fabricantes. Assim, o ISOBUS reduz a necessidade da troca ou o sucateamento de máquinas por motivo de obsolescência da eletrônica.

A Parte 7, "Camada de aplicação de mensagens do implemento", detalha o formato binário das mensagens que trafegam em pacotes de dados com informações da aplicação agrícola, como valores de hora, velocidade, distância, navegação (receptor GNSS – *Global Navigation Satellite System*), parâmetros da Tomada de Potência (TDP), atuadores e sensores hidráulicos, engate de três pontos, iluminação e demais *status* ou comando que um implemento fornecer ao trator.

O descritivo da Parte 8, "Mensagens do trem de força", é trazido da SAE J1939. Na realidade, faz referência à SAE J1939/71, que é a parte da J1939 que descreve a "Camada de aplicação" utilizada na comunicação e na troca de dados em motores e transmissão de veículos, motivo pelo qual possui apenas três páginas.

A Parte 9, "ECU (Unidade de Controle Eletrônico) do trator", como mencionado na apresentação da Parte 4, é uma Unidade de Conexão de Rede (NIU) especial, que conecta o barramento do implemento ao "barramento" do trator. É essa ECU que responde pela maioria das mensagens que trafegam no barramento do implemento, cujo formato está detalhado na Parte 7 e é conhecida também por TECU. É importante observar que os tratores podem ter especializações e características próprias, como uma TDP frontal, que não é comum no Brasil, e pode-se assim resultar em tratores com número maior de sensores e informações de que um implemento poderia se beneficiar; porém,

seria inadequado exigir que todos tratores tivessem a configuração completa. Por esse motivo, existem três classes de TECU, das mais simples às mais completas. Para um projetista de ECU implemento, é importante que chequem, por meio da sua programação, todas as informações e todos os recursos disponíveis no trator para aproveitar o seu potencial ou limitar seus recursos em caso da indisponibilidade de uma informação.

A Parte 10, "Controlador de tarefas e intercâmbio de dados do sistema de informações de gestão", é a que descreve os requisitos dos módulos de interface entre o conjunto máquina-agrícola com os sistemas de gestão externos, além de realizar o comando e a operação da aplicação agrícola, como, por exemplo, controle de seção, aplicação de insumo à taxa variada, entre outros. Essa ECU recebe e entrega os arquivos que possibilitam o uso da AP propriamente dita, recebendo mapas com as recomendações de aplicação de insumos, como sementes e fertilizantes, conforme elaborados pelo gestor. O meio de comunicação dos dados (por exemplo, com fio, sem fio, dispositivo de memória) é aberto, podendo ser definido pelo fabricante, mas o formato dos arquivos digitais trocados deve possuir estrutura baseado em XML (*Extensible Markup Language*), padrão importante para troca de dados e de informações com sistema de gestão da produção agrícola. É questionável o motivo da implementação de tantas funções em apenas uma ECU, visto a arquitetura modular do sistema, mas, provavelmente, foi a opção mais favorável no ponto de vista do técnico projetista que iniciou esse processo. Para cada nova função, esta parte deve ser atualizada.

A Parte 11 é chamada de "Dicionário de elementos de dados móveis" e aponta para o endereço de um sítio de Internet, no qual um conjunto de mais de 650 dados (até julho de 2022), com seus códigos definidos, estão publicados e são atualizados pela AEF. São dados, como taxa aplicada, largura de faixa, tamanho de gota, pressão de pneu, temperatura, voltagem, entre outros, todos descritos e definidos com seus máximos e mínimos, unidades e outras informações necessárias ao uso dos dados em máquinas, e que devem ser definidos. Em conjunto com a Parte 7, a Parte 11 define os dados que trafegam nos barramentos, tornando-se partes fundamentais para dispositivos que buscam obter dados para Sistemas de Informação para Gestão da Propriedade Agrícola ou FMIS (*Farm Management Information System*), que são *softwares* e sistemas digitais que auxiliam na gestão junto ao agricultor. Alguns desses dispositivos estão ilustrados na Figura 3.

As Partes 12, 13 e 14 referem-se a definições acessórias relacionadas com o diagnóstico de sistemas, o armazenamento de dados e a sequência automática de operações. Muitas das definições não fazem parte dos requisitos mínimos de implantação da norma, sendo, portanto, acessórios para aprimoramento do sistema. A Parte 12, "Serviço de diagnóstico", descre-

Figura 3. Dispositivos que realizam leitura dos dados do barramento CAN (CanPlug da Farmersedge; PUC da Famobile; Fieldview da Climate – Bayer; Sync drive – Next da Jacto).

ve os dados e comandos para acessar as informações das ECU conectadas na rede, como as versões, fabricantes, e também permite que sejam investigadas todas as funcionalidades que o trator apresenta, incluindo o diagnóstico do sistema e as falhas ocorridas, se houver. A Parte 13 especifica como utilizar o sistema de armazenamento de dados em arquivo presente no servidor de arquivos. O servidor realiza gestão típica de arquivos, como salvar, abrir, mover e apagar. Nessa parte, estão os descritores, a definição de nome, a data e demais atributos necessários para realizar as operações com arquivos em baixo nível. Por fim, o "Controle sequencial", Parte 14, que são regras para concatenar sequência de comandos, o que viabiliza um conjunto de operações de uma só vez. Em alguns momentos, a Parte 14 foi chamada de automação e ela prevê a realização de uma sequência de comandos, como interromper o fluxo de um líquido na barra, direcionando-o ao tanque do pulverizador, e levantar e fechar a barra, facilitando uma sequência de comandos que seria necessária em uma manobra de cabeceira.

A padronização para a comunicação entre equipamentos era uma das primeiras demandas discutidas e apontadas pela comunidade para o desenvolvimento da agricultura de precisão (National Research Council, 1997). Pode-se dizer que, com a publicação da NBR ISO 11783 (ISOBUS) e com o sistema de certificação promovido pela AEF, a base técnica da conectividade entre máquinas e implementos foi concluída. Foi um esforço de fabricantes, com colaboração de associações e de universidades. A participação da academia, apesar de presente, foi apoiar as discussões.

Talvez seja uma questão de tempo para que os equipamentos estejam compatíveis com o padrão ISOBUS de forma mais ampla. Seria difícil imaginar máquinas e tratores híbridos com seus implementos acionados eletronicamente não apresentarem conectividade, pois os padrões de ECU e de controle de segurança para eletrificação de alta tensão estão sendo previstos com base no ISOBUS.

No mercado de máquinas brasileiras, percebe-se, além da presença de representantes de empresas que participam internacionalmente no mercado do ISOBUS, a participação de ainda poucas iniciativas nacionais. A implementação não é simples devido principalmente aos numerosos itens que foram incorporados a esse padrão. Oksanen e Auernhammer (2021) afirmam que o custo de desenvolvimento é baixo, argumentando que bastam a aquisição de partes (vide coluna preço da norma da Tabela 1) e a presença de profissional que domine a técnica e, tacitamente, o padrão. Se o sistema ISOBUS fosse aberto, como Linux, talvez fosse mais fácil concordar com Okanen e Auernhammer. Ainda não há material didático estruturado para que os profissionais possam consultar e dominar os pontos mais intrincados da implementação. Talvez o melhor e mais recente material seja a palestra "*The Open Hard-Wired Network Standard for Tractor-Implement Communication*", demandada pela ASABE (Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas e Biológicos) aos dois distintos autores que estão citados e referenciados neste capítulo. É nesse documento que os autores fazem uma reflexão e comentam o futuro desse padrão. Pode-se salientar que o ISOBUS está evoluindo e depende de voluntários. Para o mercado, deseja-se uma adoção de forma mais ampla para que o benefício da compatibilidade chegue aos produtores. No Brasil, talvez um incentivo público e/ou privado, de forma estratégica para o desenvolvimento e a adoção, seja interessante.

4 AS NOVAS FRONTEIRAS DA ELETRÔNICA EMBARCADA E DA AGRICULTURA DE PRECISÃO

Nos equipamentos atuais, sensores, atuadores e processadores eletrônicos/digitais estão incorporados e raros são os lançamentos de novos modelos completamente mecânicos. É cada vez mais comum sinais eletrônicos trafegarem normalmente nos barramentos das máquinas agrícolas. Sinais estão sendo capturados e enviados com dados digitais à nuvem. É cada vez mais viável ter os dados da lavoura em quase tempo real, em qualquer lugar do Planeta, desde que haja conectividade.

Mapas de produtividade e de monitoramento de aplicação de insumos fornecem cada vez mais informações importantes para o gerenciamento da lavoura. É a resposta ao avanço das experimentações no âmbito da fazenda (*On-Farm Experimentation*) como sinal de amadurecimento do mercado e dos produtores.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A disponibilidade de um padrão de comunicação digital para tratores e implementos era um dos desafios priorizados por especialistas já na década de 1990, ao constatar a oferta de diversos equipamentos com soluções proprietárias existentes no mercado, à época. A falta de padronização gerava dificuldade para os agricultores em garantir manutenção ou atualizar o seu parque de máquinas sem esbarrar no problema da incompatibilidade de conexão elétrica e de dados (National Research Council, 1997). Esse desafio foi tecnicamente vencido com o estabelecimento do padrão ISOBUS e o seu processo de certificação. No Brasil essa norma foi disponibilizada pela ABNT (CE-203:019.002 – Comissão de Estudo de

Comunicação e Eletrônica Embarcada) e disponível como NBR ISO 11783, com a última das 14 partes publicada em 2021. Apesar de ainda não estar plenamente presente no mercado nacional, existem expectativas de que os fabricantes desenvolvam produtos compatíveis, pois as soluções de eletrificação (alta tensão) e telemetria tanto para controlar os atuadores como para monitorar operações dependem dessa possibilidade de conectividade. Sem essa padronização, a agricultura poderá continuar seu processo de digitalização e será difícil viabilizar sistemas híbridos (acionamento mecânico e elétrico) mais eficientes no campo, o que pode impactar na evolução da agricultura de precisão no País.

REFERÊNCIAS

BRYAN, J. B. **Power of deterministic thinking in machine tool accuracy**. 1984. Disponível em: https://www.osti.gov/biblio/6561460-power-deterministic-thinking-machine-tool-accuracy. Acesso em: 12 jul. 2021.

EVANS, C.J., 2012. Precision engineering: an evolutionary perspective. **Philosophical Transactions - Royal Society. Mathematical, Physical, and Engineering Sciences**, v. *370*, n. 1973, p. 3835-3851. DOI: http://doi.org/10.1098/rsta.2011.0050.

FRANZEN, D.; MULLA, D. A history of precision agriculture. In: ZHANG, Q. (Ed.). **Precision agriculture technology for crop farming**. Washington: CRC Press, 2016. p. 1-20.

INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (Eds.) **Agricultura de precisão: um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação**, 2011, 334 p.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Precision Agriculture in the 21st Century:** *geospatial and information technologies in crop management.* Washington, DC: The National Academies Press, 1997. 159 p.

OKSANEN, T.; AUERNHAMMER, H. The open hard-wired network standard for tractor-implement communication, 1987-2020. In: AGRICULTURAL EQUIPMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, Louisville, 2021. **Proceedings** [...]. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2021.

STONE, M. L.; BENNEWEIS, R. K.; VAN BERGEIJK, J. Evolution of electronics for mobile agricultural equipment. **Transactions of the ASABE**, v. *51*, n. 2, p. 385-390, 2008. DOI: http://doi.org/10.13031/2013.24374.

Alinhamento das tecnologias de automação, agricultura de precisão e digital aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis

5

Alignment of automation, precision and digital agriculture technologies with the Sustainable Development Goals

Alberto Carlos de Campos Bernardi[1], Evandro Chartuni Mantovani[2], Paulo Sergio de Paula Herrmann Junior[3], Maria Angelica de Andrade Leite[4], Breno Silva Beda de Assunção[5], Ricardo Yassushi Inamasu[6], Ricardo Fonseca Araujo[7], Margareth Gonçalves Simões[8], Ronaldo Pereira de Oliveira[9], Thiago Teixeira Santos[10]

[1] *Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alberto.bernardi@embrapa.br*
[2] *Pesquisador Aposentado, Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas (MG), Brasil, mantovani.evandro@gmail.com,*
[3] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, paulo.herrmann@embrapa.br*
[4] *Pesquisador, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, angelica.leite@embrapa.br*
[5] *Analista, Embrapa - Secretaria de Inovação e Negócios, Brasília (DF), Brasil, breno.assuncao@embrapa.br*
[6] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, ricardo.inamasu@embrapa.br*
[7] *Analista, Embrapa - Secretaria de Inovação e Negócios, Brasília (DF), Brasil, ricardo.araujo@embrapa.br*
[8] *Pesquisadora, Embrapa Solos, Rio de Janeiro (RJ), Brasil, margareth.simoes@embrapa.br*
[9] *Pesquisador, Embrapa Solos, Rio de Janeiro (RJ), Brasil, ronaldo.oliveira@embrapa.br*
[10] *Pesquisador, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, thiago.santos@embrapa.br*

RESUMO

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e suas metas compõem uma agenda mundial para subsidiar a elaboração de políticas públicas com foco no desenvolvimento sustentável do planeta até 2030, erradicando a pobreza e promovendo uma vida digna para todos. A atuação da Embrapa está fortemente vinculada aos ODS. As tecnologias de automação, agricultura de precisão e digital podem contribuir para o aumento da produtividade e sustentabilidade dos sistemas produtivos e apoiar a geração de ativos que agreguem valor aos produtos e processos agropecuários. Essa área emergente e inovadora necessita de grande esforço da pesquisa científica e tecnológica visando a incorporação dessas tecnologias nos sistemas de produção de forma rápida e eficiente, levando a Embrapa a instituir o Portfólio Automação, Agricultura de Precisão e Digital. Este capítulo indica o alinhamento das tecnologias de automação, agricultura de precisão e digital, com as metas dos ODS, que estão vinculadas aos ODS 1 (erradicar a pobreza), 2 (erradicar a fome), 6 (água potável e saneamento), 8 (trabalho digno e desenvolvimento econômico), 9 (inovação e infraestrutura), 12 (consumo e produção responsáveis) e 15 (vida terrestre). Conclui-se que as tecnologias de automação, agricultura de precisão e digital contribuem, direta ou indiretamente, para o alcance de 28 metas vinculadas aos sete ODS.

Palavras-chave: metas de desenvolvimento sustentável; segurança alimentar; intensificação sustentável.

ABSTRACT

The Sustainable Development Goals (SDGs) and their targets make up a global agenda to subsidize the public policy elaboration focused on the planet's sustainable development by 2030, eradicating poverty and promoting a dignified life for all. Embrapa's activities are strongly linked to the SDGs. Automation, precision agriculture, and digital technologies can increase the productivity and sustainability of production systems and support the generation of assets that add value to agricultural products and processes. This emerging and innovative area requires a great effort from scientific and technological research aimed at incorporating these technologies into production systems quickly and efficiently, leading Embrapa to set up the Automation, Precision, and Digital Agriculture Portfolio. This chapter indicates the alignment of automation, agriculture, and precision and digital technologies, with the SDGs, which are linked to SDG 1 (eradicate poverty), SDG 2 (eradicate hunger), SDG 6 (clean

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000068

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

water and sanitation), SDG 8 (decent work and economic development), SDG 9 (innovation and infrastructure), SDG 12 (responsible consumption and production), and SDG15 (life on land). It was concluded that automation, agriculture, precision, and digital technologies contribute, directly or indirectly, to the achievement of 28 goals linked to the 7 SDGs.

Keywords: sustainable development goals; food security; sustainable intensification.

1 INTRODUÇÃO

As novas tecnologias digitais e de automação de máquinas e equipamentos serão imprescindíveis para garantir a segurança alimentar no futuro e, com isso, a agricultura digital trará ganhos importantes em eficiência, auxiliando os agricultores a tornar essa atividade cada vez mais sustentável. As tecnologias digitais contribuem na solução de problemas tradicionais da agricultura, modificando os processos operacionais, melhorando a experiência do cliente e estabelecendo novos modelos de negócios (Massruha et al., 2020). No cenário atual de necessidade de expansão da produção e maior qualidade dos produtos, e diante da menor oferta de mão de obra, o uso das tecnologias digitais pode ser decisivo na gestão da propriedade, considerando a variabilidade espacial e a individualização dos animais para maximizar o retorno econômico e minimizar os riscos de danos ao meio ambiente (Bassoi et al., 2019).

O sucesso do setor agropecuário brasileiro se deve em grande parte ao desenvolvimento, adaptação e adoção de tecnologias agronômicas, conhecimento e gestão no processo de produção (Embrapa, 2018), com destaque para cultivares e raças adaptadas, sistemas de manejo do solo, da planta e da água (fertilizantes, corretivos, defensivos, irrigação, plantio direto etc.), com o apoio das empresas de máquinas e equipamentos que possibilitaram uma mecanização agrícola de precisão.

Somam-se a isso, ainda, as novas tecnologias de automação em máquinas e equipamentos agrícolas, com o uso de sensores e atuadores, Internet das Coisas (IoT), gerando grandes quantidades de dados das áreas produtivas. O conceito do "big data" refere-se a dados (principalmente) não estruturados, oriundos de múltiplas fontes e que deverão ser coletados, armazenados, integrados e analisados no intuito de gerar informações para a tomada de decisão (Souza et al., 2020). O "big data" apoia-se no uso da computação em nuvem para integração de sistemas que estão cada vez mais presentes no campo como resultado da transformação digital com que a sociedade vem passando. São vários exemplos de sucesso como:

- Na área de insumos agrícolas que estão sendo aplicados por mecanismos e controladores embarcados inteligentes;
- No monitoramento de áreas produtivas por imagens de drones;
- Nas decisões de intervenção para combate de pragas e doenças, deficiência nutritiva ou de água, que estão sendo tomadas com auxílio de imagens de satélite, em séries temporais, com estratégias de manejo sendo implementadas com ajuda de plataformas de informação;
- No manejo da produção de produtos orgânicos apoiado por robôs;
- Na produção vertical automatizada com infraestrutura integrada à internet;
- Na fenotipagem de plantas de alto desempenho digital, auxiliando nas investigações de fatores bióticos e abióticos, e o ganho genético de culturas de interesse;
- No uso de *machine learning* para o monitoramento por satélite dos sistemas integrados de produção (iLPF);
- e em diversas outras tecnologias ainda em desenvolvimento.

De acordo com Inamasu et al. (2016), a automação agropecuária é definida como um sistema no qual os processos operacionais de produção agrícola, pecuária e/ou florestal são monitorados, controlados e executados por meio de máquinas e/ou dispositivos mecânicos, eletrônicos ou computacionais, para ampliar a capacidade de trabalho humano. Dessa forma, a automação pode atuar nos processos visando otimizar as atividades agrícolas, pecuárias e florestais para:

- Aumentar a produtividade do sistema e do trabalho;
- Otimizar o uso de tempo;
- Otimizar uso de insumos e capital;
- Reduzir perdas na produção;
- Aumentar a qualidade dos produtos;
- Reduzir os erros de variância fenotípica e a reprodutibilidade nos estudos de melhoramento;
- Melhorar a qualidade de vida dos trabalhadores da lavoura e das cadeias.

Complementando as transformações que ocorrem atualmente em diferentes setores, a agricultura digital (AD), inspirada na transformação digital da sociedade, incorpora conceitos da indústria 4.0 descritos a seguir (Tabela 1), e que integram a agricultura de precisão, conectividade agrícola, sistemas de infor-

Tabela 1. Tecnologia e conceitos da indústria 4.0 aplicados na agricultura digital (AD).

Tecnologias	Conceitos
• Computação em nuvem	Cloud, Fog, Mist e Edge Computing com LoRa, ZigBee, Mesh, BTLE, redes NB e LTE - 5g
• Análise de grande volume de dados	Big data e Analytics, Data Warehouse, mineração de dados e variações
• Realidade virtual e aumentada, Internet das Coisas (iot), inteligência artificial	Aprendizado de máquinas, reconhecimento de padrões e variantes
• Sistemas robóticos autônomos, novos modelos de negócios, integração horizontal e vertical	Integração de processos da gestão da produção como ERP – Planej. de Recursos Corp., *blockchain*
• Conectividade agrícola	Padrões de comunic. como ISOBUS e iniciativas como a AgGateway

mação geográfica para gestão territorial e a automação agrícola na forma mais abrangente.

Para a Embrapa (2020), a AD é um conjunto de métodos computacionais de alto desempenho, rede de sensores, comunicação de máquina para máquina (M2M), conectividade entre dispositivos móveis, computação em nuvem, métodos e soluções analíticas para processar grandes volumes de dados e construir sistemas de suporte à tomada de decisões de manejo, englobando agricultura e pecuária de precisão, automação e robótica agrícola, técnicas de big data e Internet das Coisas.

A exemplo de demais setores, a expectativa dos benefícios da AD é de maior eficiência operacional dos processos de produção e de maior transparência, além de contribuir nos demais elos da cadeia envolvendo a pré-produção e a pós-produção, como logística na distribuição de insumos e produtos, eficiência na geração de novas variedades de plantas e animais, aproximação do produtor ao cliente. Essa nova onda de tecnologias digitais tem gerado oportunidades de negócios para indústrias, startups e empresas de serviço e consultorias no Brasil, bem como demandas e questionamentos para a pesquisa agropecuária.

Em um recente levantamento realizado no Brasil com 504 produtores sobre o uso da AD, Bolfe et al. (2020) indicaram que 84% dos entrevistados utilizam pelo menos uma tecnologia digital em seu sistema de produção. Apesar do alto índice, a pesquisa indicou que 70,4% seriam para o uso de internet em atividades gerais ligadas à produção agrícola. O principal benefício citado pelos usuários da AD refere-se à percepção de aumento de produtividade, e os principais desafios elencados estão nos custos de aquisição de máquinas, equipamentos, softwares e na conectividade. O levantamento destacou, ainda, que 95% dos produtores estão dispostos para conhecer novas tecnologias para fortalecer o desenvolvimento agrícola em suas propriedades.

1.1 Portfólio de Automação, Agricultura de Precisão e Digital da Embrapa

A Embrapa tem envidado esforços para promover a agricultura digital, sendo que o tema está entre os pilares estratégicos do seu Plano Diretor (Embrapa, 2020). Um dos objetivos estratégicos é relacionado ao tema e propõe a otimização dos sistemas produtivos agropecuários e agroindustriais por meio da automação de processos e da agricultura de precisão e digital.

Atualmente, a Embrapa possui nove portfólios[1] para incrementar a conexão entre os projetos de PD&I e o direcionamento estratégico da programação definido pelas metas de impacto e pelos objetivos estratégicos da empresa, bem como aos desafios das megatendências apontadas no Documento Visão: 2030 (Embrapa, 2018), por meio dos desafios de inovação. A Embrapa tem nesses portfólios os instrumentos de apoio gerencial para organização de projetos em temas estratégicos, definido pelas metas de impacto e pelos objetivos estratégicos da empresa.

O Portfólio de Automação, Agricultura de Precisão e Digital (Inamasu et al., 2016)esteve ativo entre dezembro de 2013 e junho de 2024 e tinha como objetivos "planejar, promover e acompanhar os processos de desenvolvimento, de adaptação e disseminação dos conhecimentos e tecnologias em automação, agricultura de precisão e agricultura digital para o aumento de produtividade e sustentabilidade dos sistemas produtivos e apoiar a geração de ativos que agreguem valor aos produtos e processos agropecuários". Atualmente foi reformulado está organizado como o Portfólio Transformação digital na agricultura.

Assim, a automação, como área emergente e inovadora, necessita de grande esforço da pesquisa científica e tecnológica visando a incorporação dessas tecnologias nos

[1] Disponível em: https://www.embrapa.br/pesquisa/portfolios. Acesso em: 24 out 2024.

Tabela 2. Desafios para inovação do Portfólio de Automação, Agricultura de Precisão e Digital.

Desafios para inovação
• Prover soluções digitais e ciberfísicas em apoio à identificação, rastreabilidade, sensoriamento e à certificação de rebanhos e de produtos de origem animal e vegetal
• Viabilizar a automação do manejo e produção de espécies vegetais e animais em ambientes de produção agrícola, considerando as especificidades regionais de cada bioma
• Viabilizar a conectividade de dispositivos atuadores e sensores em áreas agrícolas das regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste, para aplicações em agricultura de precisão e agricultura digital
• Viabilizar a integração e conectividade entre agricultura de precisão e digital para monitoramento e manejo dos sistemas
• Viabilizar ferramentas de fenotipagem de alta resolução e automação para uso no melhoramento de bovinos, milho, soja e cana-de-açúcar tolerantes aos fatores bióticos e abióticos
• Viabilizar plataformas digitais integradas para irrigação de precisão, análise de solos, de plantas e de animais das principais commodities agropecuárias (soja, milho, trigo, algodão, açúcar, citros, celulose e carnes suína, frango e bovina)
• Viabilizar soluções digitais e ciberfísicas de suporte à análise de dados e à tomada de decisão e gestão da produção na propriedade rural

sistemas de produção de forma rápida e eficiente. Nesse cenário, o Comitê Gestor do Portfólio Automação (CGPort Automação) realizou análise dos principais problemas e oportunidades de pesquisa com sugestões de diversas unidades da Embrapa, Universidades e parceiros da iniciativa privada, definindo um conjunto de Desafios para Inovação – DI (Tabela 2). Para facilitar a indução dos novos projetos, os conjuntos foram priorizados em sete DIs, na busca de soluções de problemas para gestão inteligente dos sistemas de produção.

2 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (ODS)

Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas (Santos et al., 2018), que compõem uma agenda mundial para subsidiar a elaboração de políticas públicas. Os ODS foram definidos para transformar a economia, a sociedade e o meio ambiente do mundo e representam medidas para promover o desenvolvimento sustentável do planeta até 2030, erradicando a pobreza e promovendo uma vida digna para todos. Constituem um apelo universal para proteger o planeta e garantir que todas as pessoas tenham dignidade, visando conduzir governos, empresas e sociedades para um mundo mais sustentável e inclusivo. Eles servem como uma orientação para os países superarem os desafios ambientais, políticos e econômicos mais urgentes. A atuação da Embrapa está fortemente vinculada aos ODS[2] (Santos Valle; Kienzle, 2020).

Nesse contexto, o trabalho de Trendov et al. (2019) considerou três eixos para identificar possíveis áreas de melhoria e aceleração das tecnologias digitais na agricultura e no meio rural: i) econômica: as tecnologias podem contribuir para aumentar a produtividade, reduzir os custos de produção e logística, reduzir a perda e o desperdício de alimentos, aumentar as oportunidades de mercado, trazer sustentabilidade ao nível dos agricultores, cadeias de valor e países e aumentar o PIB do setor e nacional; ii) social e cultural: as tecnologias podem criar um efeito integrador a nível social e cultural através dos mecanismos de comunicação; iii) ambiental: a AP e AD permitem monitorar e otimizar os processos de produção, bem como as cadeias de valor e os produtos entregues, além de permitir a prevenção e adaptação às mudanças climáticas e o melhor uso dos recursos naturais.

Sendo o Brasil um dos maiores produtores e exportadores agrícolas mundiais, para que o país possa garantir, ou mesmo ampliar, sua capacidade de produção com sustentabilidade, ao mesmo tempo atender a demanda global por segurança alimentar e nutricional como um grande exportador de commodities agrícolas, tornam-se necessárias a modernização, a tecnificação e a inovação em toda a cadeia de produção agrícola, convergindo para o uso da automação e a viabilização da AP e AD como resultado da transformação digital do setor.

Muitas das novas tecnologias de AP, AD e automação ainda estão evoluindo e sendo validadas, e há muitas possibilidades para que estas tecnologias contribuam para o desenvolvimento sustentável. Mas também há desafios que incluem diversas etapas a serem cumpridas, que envolvem desde a sistematização do conhecimento gerado, padronização e integração

[2] Disponível em: https://www.embrapa.br/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods. Acesso em: 30 set. 2024.

de métodos, tradução do conhecimento em soluções para inovação pela sociedade e a disponibilidade de recursos financeiros. Este capítulo alinha as tecnologias de automação, agricultura de precisão e digital com as metas dos ODS como uma forma de aproximar o trabalho de pesquisa com os tomadores de decisão, indicando a aplicação prática dessas tecnologias.

2.1 Alinhamento da automação, agricultura de precisão e digital às metas dos ODS

As contribuições para os aspectos ambiental, social e econômico associados às metas dos referidos ODS foram abordadas nas publicações de Costa et al. (2018), Krolow et al. (2018), Medeiros et al. (2018), Mello et al. (2018), Vilela et al. (2018), Palhares et al. (2018), Santos Valle e Kienzle (2020) e Silva et al. (2018).

As tecnologias digitais podem contribuir na melhoria dos meios de subsistência, especialmente dos pequenos produtores, pela redução do trabalho manual e repetitivo e melhoria da produtividade. Também podem contribuir com aumento da produção (em comparação com os alcançados com as práticas tradicionais), aumentando a renda e a oferta e a ingestão de alimentos (Santos Valle; Kienzle, 2020).

Costa et al. (2018) apresentaram as soluções relacionadas aos sistemas agroalimentares sustentáveis desenvolvidos pela Embrapa que contribuem com as metas do ODS 1 "**Erradicação da pobreza**". Os autores destacam que a pobreza não deve ser considerada apenas do ponto de vista da privação de recursos financeiros, mas, também de forma ampla, como a privação de recursos, capacidades, escolhas, segurança e poder.

A escassez de mecanização no campo limita a capacidade de trabalho (ha/h) e eleva o custo de produção da agricultura familiar, como consequente diminuição da renda. A inclusão tecnológica da agricultura familiar e a elevação da renda devem ser prioridades nos próximos anos, e a utilização das tecnologias de automação, AP e AD, deverão ser decisivas para alcançar esses objetivos. O aumento do valor agregado dos produtos exigirá mecanismos mais elaborados, demandantes de tempo e de dedicação, de modo que a adoção de práticas modernas de tratos de animais e de cultivo poderá ser decisiva. Porém, a falta de conectividade no campo, tanto vertical como horizontal, é crítica para o desenvolvimento da automação e AD. Por isso, será essencial promover a cobertura digital de grandes extensões de área de produção agrícola.

Para Santos Valle e Kienzle (2020), as tecnologias digitais promovem a segurança alimentar e a nutrição adequada, pelo aumento da produção e produtividade agropecuária, e a diversificação das espécies cultivadas devido à otimização do sistema de produção, que dessa forma podem contribuir para a redução da dependência de alimentos de áreas de produção distantes. Além disso, a diversificação do consumo pode aumentar a oferta e a ingestão de alimentos, e consequentemente contribuir para melhoria da nutrição geral.

A contribuição da Automação, Agricultura de Precisão e Digital para o ODS 2 **"Fome zero"** e agricultura sustentável ocorre nas metas 2.1, 2.3, 2.4, 2.5, 2.a e 2.b. As perspectivas e os entraves para o avanço em busca da superação do grave problema representado pela fome e desnutrição, e da redução dos impactos provocados pela atividade agrícola sobre o meio ambiente, foram discutidos por Medeiros et al. (2018).

As soluções digitais e ciberfísicas possibilitarão monitorar os rebanhos e produtos de origem animal e vegetal, atestando sua qualidade, promovendo melhoria na sua produtividade e permitindo o acompanhamento do mercado e do comércio. Dessa forma contribuindo, especialmente, com as metas de produção de alimentos seguros, nutritivos e suficientes (2.1); aumento de produtividade / renda / tecnolo-

ODS 1. Erradicação da pobreza

Metas associadas*:
1.1 - Até 2030, erradicar a pobreza extrema para todas as pessoas em todos os lugares, atualmente medida como pessoas vivendo com menos de US$ 1,25 por dia;
1.2 - Até 2030, reduzir pelo menos à metade a proporção de homens, mulheres e crianças, de todas as idades, que vivem na pobreza, em todas as suas dimensões, de acordo com as definições nacionais.

* Adaptado de: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/1

ODS 2. Fome zero e agricultura sustentável

Metas associadas*:
2.1 - Até 2030, acabar com a fome e garantir o acesso de todas as pessoas, em particular os pobres e pessoas em situações vulneráveis, incluindo crianças, a alimentos seguros, nutritivos e suficientes durante todo o ano
2.3 - Até 2030, dobrar a produtividade agrícola e a renda dos pequenos produtores de alimentos, particularmente das mulheres, povos indígenas, agricultores familiares, pastores e pescadores, inclusive por meio de acesso seguro e igual à terra, outros recursos produtivos e insumos, conhecimento, serviços financeiros, mercados e oportunidades de agregação de valor e de emprego não agrícola
2.4 - Até 2030, garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção, que ajudem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo
2.5 - Até 2020, manter a diversidade genética de sementes, plantas cultivadas, animais de criação e domesticados e suas respectivas espécies selvagens, inclusive por meio de bancos de sementes e plantas diversificados e bem geridos em nível nacional, regional e internacional, e garantir o acesso e a repartição justa e equitativa dos benefícios decorrentes da utilização dos recursos genéticos e conhecimentos tradicionais associados, como acordado internacionalmente
2.a - Aumentar o investimento, inclusive via o reforço da cooperação internacional, em infraestrutura rural, pesquisa e extensão de serviços agrícolas, desenvolvimento de tecnologia, e os bancos de genes de plantas e animais, para aumentar a capacidade de produção agrícola nos países em desenvolvimento, em particular nos países menos desenvolvidos.
2.b - Corrigir e prevenir as restrições ao comércio e distorções nos mercados agrícolas mundiais, incluindo a eliminação paralela de todas as formas de subsídios à exportação e todas as medidas de exportação com efeito equivalente, de acordo com o mandato da Rodada de Desenvolvimento de Doha

* Adaptado de: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/2

gia / agregação de valor (2.3) e subsídios e restrições (2.b) no que se refere a corrigir e prevenir as restrições ao comércio e distorções nos mercados agrícolas mundiais.

O uso da automação dos sistemas produtivos vai permitir um controle mais preciso da produção por meio de automatização de manejos como irrigação, plantio, aplicação de fertilizantes e inseticidas, de acordo com a necessidade da planta, além da realização e acompanhamento da colheita, entre outros, possibilitando um ganho de produtividade de forma sustentável com o uso racional dos recursos naturais. Um outro aspecto importante é que podem contribuir para o aumento da diversidade genética, pela valorização da produção local, e para a redução da dependência externa e distantes de produção e suprimento de sementes. Esse processo vai impactar positivamente as metas de produção de alimentos seguros, nutritivos e suficientes (2.1); melhoria da produtividade / renda / tecnologia / agregação de valor (2.3); garantia de sistemas sustentáveis de produção (2.4) e diversidade genética de sementes (2.5).

O uso de dispositivos atuadores e sensores em áreas agrícolas para aplicações em AP e AD possibilitará a coleta de dados em vários estágios do sistema produtivo. O uso de sistemas inteligentes, e gerando conhecimento para a tomada de decisão baseada em conhecimento, garantirá sistemas sustentáveis de produção de alimentos, que aumentem a produtividade e a produção, que auxiliem a manter os ecossistemas, que fortaleçam a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres, e que melhorem progressivamente a qualidade da terra e do solo (2.4).

A AP e AD integradas possibilitarão o armazenamento dos dados coletados pelas máquinas e sensores, e a aplicação de modelos e algoritmos de inteligência artificial pela AD sobre os dados de monitoramento. Com isso, será possível implementar o manejo dos sistemas levando a agricultura baseada em conhecimento, e apoiar o uso de sistemas cada vez mais sustentáveis para a produção de alimentos, ao mesmo tempo em que utiliza os recursos naturais de forma racional levando em conta a capacidade de adaptação às mudanças climáticas e eventos extremos (2.4).

As ferramentas de fenotipagem de alta resolução e automação: i) são úteis para melhorar sistemas sustentáveis de produção de alimentos, e dessa forma contribuir no melhoramento e pré-melhoramento de plantas e animais (2.4.); ii) subsidiam a transfe-

rência de genes, que estão armazenados em bancos de germoplasmas, permitindo alcançar características desejáveis a plantas e animais e melhoramento genético, incluindo o pré-melhoramento; iii) subsidiarão o aumento em investimento, tanto para cooperação internacional como no âmbito da melhoria de infraestrutura rural, de pesquisa e extensão de serviços agrícolas, com o objetivo de transferir tecnologias para aumentar a capacidade agrícola de países em desenvolvimento (2a).

As plataformas digitais integradas para irrigação de precisão aplicadas aos sistemas de produção sustentáveis, poderão ser resilientes nos sistemas produtivos com economia de água e com impacto na produção integrado a outros fatores, como fertilidade, sementes de qualidade, controle de fitossanidade etc., e ajudando a manter os ecossistemas no que se relaciona as mudanças climáticas (2.4). Essas plataformas também subsidiarão o aumento do investimento, tanto para cooperação internacional como no âmbito da melhoria de infraestrutura rural, de pesquisa e extensão de serviços agrícolas, com o objetivo de transferir tecnologias para aumentar a capacidade agrícola de países em desenvolvimento (2.a).

O uso de soluções digitais e ciberfísicas integradas para suporte à tomada de decisão na propriedade rural vai gerar conhecimentos que possibilitem a otimização de uso de insumos, o uso dos recursos naturais de forma sustentável, e mesmo preservá-los, levando a garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e aumento de produção e produtividade (2.4).

De acordo com Silva et al. (2018), água limpa e de qualidade é essencial para a saúde humana, bem-estar e prosperidade. O acesso à água em quantidade suficiente é uma necessidade básica do ser humano, tanto para o seu consumo próprio quanto para o desenvolvimento de suas atividades econômicas, culturais, de lazer e outras. A contribuição da Automação, Agricultura de Precisão e Digital para o ODS 6 **"Água potável e saneamento"** ocorre nas metas 6.4, 6.5 e 6.6.

O uso de dispositivos atuadores e sensores em áreas agrícolas para aplicações em agricultura de precisão e agricultura digital vai permitir a coleta de dados em várias fases do sistema produtivo desde a plantação até a colheita, considerando também a irrigação, possibilitando o uso de sistemas inteligentes e gerando informações para a tomada de decisão baseada em conhecimento acarretando uma melhor gestão do uso dos recursos hídricos (6.4).

A AP e AD integradas possibilitarão o armazenamento dos dados coletados pelas máquinas e sensores da AP e a aplicação de modelos e algoritmos de inteligência artificial pela AD sobre os dados de monitoramento e o manejo dos sistemas, principalmente aqueles que se referem ao uso de água, levando a uma agricultura baseada em conhecimento que vai permitir uma melhor gestão dos recursos hídricos e seu uso de maneira eficiente (6.4).

As plataformas digitais aplicadas à irrigação de precisão são plataformas de gestão do uso de água na agricultura para evitar desperdício (6.4, 6.5) e permitir evitar excessos e proteger o lençol freático de lixiviação de água contendo elementos químicos aplicado ao solo (6.6).

O uso de soluções digitais e ciberfísicas integradas para suporte à tomada de decisão na propriedade rural gerará informações que possibilitam o uso eficiente da água (6.4), além de fomentar a gestão integrada de recursos hídricos como um todo uma vez que a

ODS 6. Água potável e saneamento

Metas associadas*:
6.4 - Até 2030, aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores e assegurar retiradas sustentáveis e o abastecimento de água doce para enfrentar a escassez de água e reduzir substancialmente o número de pessoas que sofrem com a escassez de água
6.5 - Até 2030, implementar a gestão integrada dos recursos hídricos em todos os níveis, inclusive via cooperação transfronteiriça, conforme apropriado
6.6 - Até 2020, proteger e restaurar ecossistemas relacionados com a água, incluindo montanhas, florestas, zonas úmidas, rios, aquíferos e lagos

*Adaptado de: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6

ODS 8. Trabalho decente e crescimento econômico	

Metas associadas*:
8.1 - Sustentar o crescimento econômico per capita de acordo com as circunstâncias nacionais e, em particular, um crescimento anual de pelo menos 7% do produto interno bruto [PIB] nos países menos desenvolvidos
8.2 - Atingir níveis mais elevados de produtividade das economias por meio da diversificação, modernização tecnológica e inovação, inclusive por meio de um foco em setores de alto valor agregado e dos setores intensivos em mão de obra
8.3 - Promover políticas orientadas para o desenvolvimento que apoiem as atividades produtivas, geração de emprego decente, empreendedorismo, criatividade e inovação, e incentivar a formalização e o crescimento das micro, pequenas e médias empresas, inclusive por meio do acesso a serviços financeiros
8.4 - Melhorar progressivamente, até 2030, a eficiência dos recursos globais no consumo e na produção e empenhar-se para dissociar o crescimento econômico da degradação ambiental, de acordo com o Plano Decenal de Programas sobre Produção e Consumo Sustentáveis, com os países desenvolvidos assumindo a liderança

*Adaptado de: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/8

gestão hídrica em muitas propriedades vai contribuir com o atingimento da meta a nível municipal, regional e nacional (6.5).

De acordo com Mello et al. (2018), este ODS tem foco no trabalho, no trabalhador e no desenvolvimento econômico. As tecnologias digitais podem impactar na dinâmica da migração rural-urbana, uma vez que a adoção de novas tecnologias em propriedades agrícolas impactará a produção, assistência técnica e operação e manutenção de sensores, atuadores, equipamentos e máquinas. Haverá desenvolvimento de novas oportunidades de trabalho, revitalizando os empregos no campo, e incentivando a educação e a permanência de jovens nas áreas rurais (Santos Valle; Kienzle, 2020). Segundo os autores, também haverá impacto sobre a criação de empregos e negócios, pois a necessidade de mão de obra qualificada e treinada para desenvolver, adaptar, operar e manter todos os elementos das novas tecnologias criará nichos de emprego para jovens capacitados e empresários rurais para alcançar uma produção agropecuária mais eficiente. E haverá ainda o surgimento de novos modelos de negócios.

A Automação, Agricultura de Precisão e Digital contribui para o ODS 8 **"Trabalho decente e crescimento econômico"** com soluções tecnológicas com a finalidade de mitigar ou atenuar os problemas evidenciados e contribuir para o desenvolvimento sustentável, e ocorre nas metas 8.1, 8.2, 8.3 e 8.4.

Dessa forma, o uso da automação dos sistemas produtivos vai permitir um controle mais preciso da produção por meio de automatização de manejos como irrigação, plantio, aplicação de fertilizantes e inseticidas de acordo com a necessidade da planta, além da realização e acompanhamento da colheita, entre outros, possibilitando um ganho de produtividade de forma sustentável com o uso racional dos recursos naturais levando a um maior crescimento econômico sustentável (8.1) e o uso eficiente de recursos naturais (8.4).

O uso de dispositivos atuadores e sensores em áreas agrícolas para aplicações em AP e AD possibilitará a coleta de dados em várias fases do sistema produtivo, desde a plantação até a colheita, possibilitando o uso de sistemas inteligentes e gerando informações para a tomada de decisão, baseada em conhecimento almejando obter um aumento de produtividade (8.2); bem como gerando conhecimento para apoiar políticas orientadas para o desenvolvimento que apoiem as atividades produtivas (8.3).

A AP e AD integradas possibilitarão o armazenamento dos dados coletados pelas máquinas e sensores e a aplicação de modelos e algoritmos de inteligência artificial, pela AD, sobre os dados de monitoramento. Com isso, ocorrerá a condução dos sistemas de produção baseada em conhecimento, que permitirá acompanhar melhor a produção e automatizar os manejos do sistema produtivo levando a um aumento de produtividade (8.2), permitindo gerar dados e informações para apoiar políticas de desenvolvimento (8.3) e usar os recursos naturais de forma racional e mais eficiente gerando sistemas mais sustentáveis (8.4).

O uso de soluções digitais e ciberfísicas integradas, para suporte à tomada de decisão na propriedade rural, permitirá melhorar a gestão, monitorar os

parâmetros de produção, e, assim, contribuindo para o aumento da produtividade por meio da modernização tecnológica (8.2) e o uso eficiente de recursos na produção agrícola promovendo a diminuição da degradação ambiental (8.4).

O ODS 9 **"Inovação infraestrutura"** trata do fortalecimento da inovação na pesquisa agropecuária para reduzir perdas e desperdícios de alimentos, melhorar a gestão de resíduos, desenvolver a agroindústria familiar e a exportação de alimentos, além dos desafios futuros para promover infraestruturas resilientes, industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação (Krolow et al., 2018).

As tecnologias digitais poderão contribuir para a diminuição das barreiras tecnológicas pela integração de diferentes tipos de tecnologias, como aprendizado de máquina, posicionamento por satélite ou automatização, e com isso diminuir a distância entre os países desenvolvidos e os em desenvolvimento. As novas tecnologias são adaptáveis e possibilitam a adoção em diferentes sistemas de produção, dessa forma proporcionam saltos na evolução tecnológica da produção agropecuária, evoluindo da agricultura de subsistência com baixo nível tecnológico para a agricultura comercial baseada na AP e AD (Santos Valle; Kienzle, 2020).

A Automação, Agricultura de Precisão e Digital contribui com o alcance das metas 9.b e c, 9.1, 9.4 e 9.5. Essas tecnologias são essenciais para o fortalecimento da pesquisa científica e capacidade tecnológica na área de automação, AP e AD (9.5).

O uso de dispositivos atuadores e sensores em áreas agrícolas para aplicações em AP e AD permitirá o desenvolvimento de infraestrutura de qualidade para a coleta de dados e informações para apoiar o desenvolvimento econômico agrícola (9.1) e modernizar a infraestrutura e reabilitar a agroindústria para torná-la sustentável, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias (9.4). A AP e AD integradas possibilitarão o armazenamento dos dados coletados pelas máquinas e sensores da AP, e a aplicação de modelos e algoritmos de inteligência artificial, pela AD, sobre os dados de monitoramento e o manejo dos sistemas, levando a uma agricultura baseada em conhecimento que vai apoiar o desenvolvimento econômico agrícola (9.1), possibilitará a modernização da infraestrutura e reabilitará a agroindústria para torná-la sustentável, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias (9.4).

As ferramentas de fenotipagem de alta resolução e automação aplicadas a plantas e animais poderão trabalhar com investimentos de infraestrutura adequados para a utilização dessa tecnologia (9.4). As ferramentas de fenotipagem de alta resolução e automação, por meio da aplicação das tecnologias de informação e comunicação (TIC) a plantas e animais, através da internet, irão contribuir na pesquisa cien-

ODS 9. Inovação e infraestrutura

Metas associadas*:
9.1 - Desenvolver infraestrutura de qualidade, confiável, sustentável e resiliente, incluindo infraestrutura regional e transfronteiriça, para apoiar o desenvolvimento econômico e o bem-estar humano, com foco no acesso equitativo e a preços acessíveis para todos
9.4 - Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente corretos, com todos os países atuando de acordo com suas respectivas capacidades
9.5 - Fortalecer a pesquisa científica, melhorar as capacidades tecnológicas de setores industriais em todos os países, particularmente os países em desenvolvimento, inclusive, até 2030, incentivando a inovação e aumentando substancialmente o número de trabalhadores de pesquisa e desenvolvimento por milhão de pessoas e os gastos público e privado em pesquisa e desenvolvimento
9.b - Apoiar o desenvolvimento tecnológico, a pesquisa e a inovação nacionais nos países em desenvolvimento, inclusive garantindo um ambiente político propício para, entre outras coisas, a diversificação industrial e a agregação de valor às commodities
9.c - Aumentar significativamente o acesso às tecnologias de informação e comunicação e se empenhar para oferecer acesso universal e a preços acessíveis à internet nos países menos desenvolvidos, até 2020

*Adaptado de: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/9

tífica, aumentando as capacidades tecnológicas do país e, consequentemente, agregando valor nas comodities (9.5, 9.b e 9.c).

As plataformas digitais integradas para irrigação de precisão, análise de solos, de plantas e de animais poderão trabalhar com investimentos de infraestrutura adequados para utilização dessa tecnologia ou através de uma ferramenta como GPS comunitário, como um marcador (latitude e longitude), que permitirá o uso do conceito de agricultura de precisão, para o mapeamento georreferenciado de áreas com solo de textura variável (argiloso, arenoso etc.), com maior ou menor grau de produção (9.1 e 9.4).

A utilização das plataformas digitais, aplicando as TIC para irrigação de precisão, análise de solos, de plantas e de animais, através da internet, irá contribuir na pesquisa científica, aumentando as capacidades tecnológicas do país e, consequentemente, agregando valor nas comodities (9.5, 9.b e 9.c).

O uso de soluções digitais e ciberfísicas integradas para suporte à tomada de decisão na propriedade rural vai fomentar o aumento do acesso às soluções de TIC nas propriedades rurais (9.c).

O consumo sustentável de bens e serviços foi definido por Palhares et al. (2018) como sendo o uso de bens e serviços para atender as necessidades básicas, proporcionar melhor qualidade de vida, concomitantemente minimizando o uso dos recursos naturais e materiais tóxicos, bem como a geração de resíduos, e a emissão de poluentes durante todo o ciclo de vida do produto ou do serviço, e dessa forma não colocando em risco as necessidades das futuras gerações. A Automação, Agricultura de Precisão e Digital contribui para o ODS 12 **"Consumo e produção responsáveis".** De acordo com Santos Valle e Kienzle (2020), a adoção de procedimentos de automação, AP e AD, para otimizar o uso de recursos e aumentar a eficiência das operações de cultivo pode contribuir com a intensificação sustentável da produção, por exemplo por meio da aplicação de insumos à taxa variável.

As soluções digitais e ciberfísicas vão possibilitar a semeadura a taxa variável e o controle localizado de pragas e plantas invasoras, permitindo que os agricultores produzam mais com menos fomentando a produção e consumo sustentável (12.1).

O uso da automação nos sistemas produtivos vai permitir um controle mais preciso da produção por meio de automatização de manejos como irrigação, plantio, aplicação de fertilizantes e inseticidas de acordo com a necessidade da planta, cultivos, colheita e monitoramento, entre outros, possibilitando um ganho de produtividade de forma sustentável com o uso racional dos recursos naturais levando a uma produção e consumo sustentáveis (12.1), melhoria na gestão e uso de recursos naturais (12.2) e redução de resíduos poluentes (12.4).

O uso de dispositivos atuadores e sensores em áreas agrícolas, para aplicações em agricultura de precisão e agricultura digital, vai permitir desenvolver infraestrutura de qualidade para a coleta de dados e informações que vão colaborar com a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais (12.2) e permitir o uso de produtos químicos conforme a necessidade da cultura levando a minimizar seu impacto negativo no ambiente (12.4).

ODS 12. Consumo e produção responsáveis

Metas associadas*:
12.1 - Implementar o Plano Decenal de Programas sobre Produção e Consumo Sustentáveis, com todos os países tomando medidas, e os países desenvolvidos assumindo a liderança, tendo em conta o desenvolvimento e as capacidades dos países em desenvolvimento
12.2 - Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais
12.4 - Até 2020, alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionais acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente
12.a - Apoiar países em desenvolvimento a fortalecer suas capacidades científicas e tecnológicas para mudar para padrões mais sustentáveis de produção e consumo

*Adaptado de: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/12

A AP e AD integradas possibilitarão o armazenamento dos dados coletados pelas máquinas e sensores, e a aplicação de modelos e algoritmos de inteligência artificial, pela AD, sobre os dados de monitoramento e o manejo dos sistemas levando a uma agricultura baseada em conhecimento o que vai colaborar com a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais (12.2) e permitir o uso de produtos químicos conforme a necessidade da cultura levando a minimizar seu impacto negativo no ambiente (12.4).

As ferramentas de fenotipagem de alta resolução e automação permitem i) interagir com vários países em desenvolvimento que inclusive apresentam infraestrutura e podem ser compartilhadas e consequentemente aumentando a capacidade tecnológica dos sistemas de produção (12.a); ii) implementação de programas com melhoramento de plantas e animais, visando uma produção sustentável.

As plataformas digitais integradas para irrigação de precisão, análise de solos, de plantas e de animais permitem a gestão para implementação de uma produção sustentável através da otimização do uso de água no solo e recursos naturais (12.1 e 12.2).

O uso de soluções digitais e ciberfísicas integradas para suporte à tomada de decisão na propriedade rural vai fornecer subsídios e conhecimentos para alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais (12.2) e, também, o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos (12.4), uma vez que vai possibilitar orientar para o uso racional de agroquímicos, fertilizantes e evitar a geração de resíduos desnecessários.

A gestão sustentável de recursos naturais pode ser alcançada pela otimização do uso de insumos, minimização dos impactos negativos da atividade agropecuária e aumento da produção sem comprometer os recursos naturais existentes (Santos Valle; Kienzle, 2020). Vilela et al. (2018) apresentaram as contribuições da Embrapa ao ODS 15 **"Vida terrestre"**, que envolve a proteção, recuperação e promoção do uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gestão sustentável das florestas, combate à desertificação, eliminação e reversão da degradação da terra e da perda de biodiversidade.

O uso da automação dos sistemas produtivos vai permitir um controle mais preciso da produção por meio de automatização de manejos como: irrigação, plantio, aplicação de fertilizantes e inseticidas de acordo com a necessidade da planta, cultivos, colheita e monitoramento das atividades, entre outros, levando a um maior conhecimento dos aspectos envolvidos no sistema de produção. Além disso, possibilita a tomada de decisão para um aumento de produtividade de forma sustentável, no que diz respeito ao mapeamento, conservação, recuperação e uso sustentável de ecossistemas terrestres e de água doce (15.1), melhoria da gestão de florestas nas propriedades rurais (15.2), combate à desertificação, restauração da terra e o solo degradado (15.3) e redução da degradação dos habitats naturais (15.5).

ODS 15. Vida terrestre

Metas associadas*:
15.1 - Até 2020, assegurar a conservação, recuperação e uso sustentável de ecossistemas terrestres e de água doce interiores e seus serviços, em especial florestas, zonas úmidas, montanhas e terras áridas, em conformidade com as obrigações decorrentes dos acordos internacionais;
15.2 - Até 2020, promover a implementação da gestão sustentável de todos os tipos de florestas, deter o desmatamento, restaurar florestas degradadas e aumentar substancialmente o florestamento e o reflorestamento globalmente
15.3 - Até 2030, combater a desertificação, restaurar a terra e o solo degradado, incluindo terrenos afetados pela desertificação, secas e inundações, e lutar para alcançar um mundo neutro em termos de degradação do solo
15.5 - Tomar medidas urgentes e significativas para reduzir a degradação de habitat naturais, deter a perda de biodiversidade e, até 2020, proteger e evitar a extinção de espécies ameaçadas

*Adaptado de: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/15

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As tecnologias de automação, a agricultura de precisão e digital possibilitarão:

- A transformação digital do setor agrícola, ao mesmo tempo em que promoverão o alcance direta ou indiretamente de 28 metas vinculadas a sete ODS (1, 2, 6, 8, 9, 12, 15);
- A incorporação nos sistemas de produção, após a implantação dos sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementação de práticas agrícolas resilientes, que aumentem a produtividade e a produção;
- Atingimento de níveis mais elevados de produtividade das economias mediante a diversificação, modernização tecnológica e inovação, inclusive por meio de um foco em setores de alto valor agregado e dos setores intensivos em mão de obra;
- Capacitação da mão de obra mais qualificada voltada a desenvolver, adaptar, operar e manter todos os elementos das novas tecnologias criará nichos de emprego para jovens capacitados e empresários rurais para alcançar a produção agropecuária mais eficiente;
- A integração de diferentes tipos de tecnologias, como aprendizado de máquina, posicionamento por satélite e automatização, contribuirá para a diminuição das barreiras tecnológicas entre os países desenvolvidos e os em desenvolvimento;
- A evolução tecnológica da produção agropecuária, passando da agricultura de subsistência com baixo nível tecnológico para a agricultura comercial competitiva;
- A gestão sustentável de recursos naturais, com a otimização do uso de insumos, minimização dos impactos negativos da atividade agropecuária e aumento da produção sem comprometer os recursos naturais existentes.

REFERÊNCIAS

BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. de C.; VAZ, C. M. P.; SPERANZA, E. A.; CRUVINEL, P. E. Agricultura de precisão e agricultura digital. **Revista Digital de Tecnologias Cognitivas**, n. 20, p. 17-36, 2019.

BOLFE, E. L.; JORGE, L. A. C.; DEL'ARCO SANCHES, I.; LUCHIARI JUNIOR, A.; COSTA, C. C.; VICTORIA, D. C.; INAMASU, R. Y.; GREGO, C. R.; FERREIRA, V. R.; RAMIREZ, A. R. Precision and digital agriculture: adoption of technologies and perception of Brazilian farmers. **Agriculture**, v. 10, n. 12, p. 1-16, 2020. http://doi.org/10.3390/agriculture10120653.

COSTA, P.; COSTA, J. R.; WANDELLI, E. V.; BIANCHINI, F.; TAVARES, E. D. **Erradicação da pobreza**: contribuições da Embrapa. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 79 p. (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, 1).

EMBRAPA. **VII Plano Diretor da Embrapa 2020-2030**. Brasília, DF, 2020. 31 p. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/217274/1/VII-PDE-2020.pdf. Acesso em: 30 set. 2024.

EMBRAPA. **Visão 2030:** o futuro da agricultura brasileira. Brasília, DF, 2018. 212 p. Disponível em: http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/194611/1/Visao-2030-o-futuro-da-agricultura-brasileira.pdf. Acesso em: 30 set. 2024.

INAMASU, R. Y.; BELLOTE, A. F. J.; LUCHIARI JUNIOR, A.; SHIRATSUCHI, L. S.; OLIVEIRA, P. A. V. de; BERNARDI, A. C. C. **Portfólio automação agrícola, pecuária e florestal**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2016. 14 p. (Embrapa Instrumentação. Documentos, 60)

KROLOW, A. C. R.; NALERIO, E. S.; SAMARY, F. T.; LIMA, L. K. F. (Ed.). **Indústria, inovação e infraestrutura:** contribuições da Embrapa. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 55 p. (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, 9).

MASSRUHA, S. M. F. S.; LEITE, M. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A. ; EVANGELISTA, S. R. M. A transformação digital no campo rumo a agricultura sustentável e inteligente. In: MASSRUHA, S. M. F. S.; LEITE, M. A. A.; OLIVEIRA, S. R. M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A. ; BOLFE, E. L.(Eds.). **Agricultura digital:** pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF: Embrapa, 2020. p. 20-45.

MEDEIROS, C. A. B.; BUENO, Y. M.; SA, T. D. A.; VIDAL, M. C.; ESPINDOLA, J. A. A. **Fome zero e agricultura sustentável:** contribuições da Embrapa. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 71 p. (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, 2).

MELLO, L. M. R.; BASSI, N. S. S.; SANTOS, L. A.; GERUM, A. F. A. A. **Trabalho decente e crescimento econômico:** contribuições da Embrapa. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 54 p. (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, 8).

PALHARES, J. C. P.; OLIVEIRA, V. B. V.; FREIRE JUNIOR, M.; CERDEIRA, A. L.; PRADO, H. A. **Consumo e produção responsáveis:** contribuições da Embrapa. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 92 p. (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, 12).

SANTOS VALLE, S.; KIENZLE, J. **Agriculture 4.0:** start agricultural robotics and automated equipment for sustainable crop production. Rome: FAO, 2020. 25 p. (Integrated SANTOS, A. C. C.; HAMMES, V. S.; LOPES, D. B.; VILELA FILHO, O.; SAMPAIO, M. J. A. M.; NALERIO, E. S.; DINIZ, F. H.; KIILL, L. H. P.; SILVA, M. S. L.; GAMBETTA, R.; ARZABE, C.; PIEROZZI JUNIOR, I. Contextualização dos objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil e na Embrapa. In: HAMMES, V. S.; LOPES, D. B.; SANTOS, A. C. C.; COSTA, J. R.; OLIVEIRA, Y. M. M. (Eds.). **Pesquisa e inovação agropecuária na agenda 2030:** contribuições da Embrapa e parceiros. Brasília, DF: Embrapa, 2018. p. 13-24.

SILVA, M. S. L. da; MATTHIENSEN, A.; BRITO, L. T. de L.; LIMA, J. E. F. W.; CARVALHO, C. J. R. de. Água e sanea-

mento: contribuições da Embrapa. Brasília, DF: Embrapa, 2018. (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, 6). Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/184235/1/ODS-6-agua-e-saneamento.pdf. Acesso em: 30 set. 2023.

SOUZA, K. X. S.; OLIVEIRA, S. R. M.; MACÁRIO, C. G. N.; ESQUERDO, J. C. D. M.; MOURA, M. F.; LEITE, M. A. A.; LIMA, H. P.; CASTRO, A.; TERNES, S.; YANO, I. H.; SANTOS, E. H. Agricultura digital: definições e tecnologias. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. A.; OLIVEIRA, S. R. M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (Eds.). **Agricultura digital:** pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF: Embrapa, 2020. cap. 2, p. 46-66.

TRENDOV, N. M.; VARAS, S.; ZENG, M. **Digital technologies in agriculture and rural areas**: status report. Rome: FAO, 2019. 140 p.

VILELA, G. F.; BENTES, M. P. M.; OLIVEIRA, Y. M. M.; MARQUES, D. K. S.; SILVA, J. C. B. **Vida terrestre:** contribuições da Embrapa. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 122 p. (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, 15).

6

Fenotipagem de plantas de alto rendimento, genotipagem, agricultura de precisão e agricultura digital para uma agricultura sustentável e produtiva

High-yield plant phenotyping, genotyping, precision agriculture and digital agriculture for sustainable and productive agriculture

Paulo Sergio de Paula Herrmann Junior[1], Alberto Carlos de Campos Bernardi[2], Breno Silva Beda de Assunção[3], Carlos Manoel Pedro Vaz[4], Evandro Chartuni Mantovani[5], Juliana Erika de Carvalho Teixeira Yassitepe[6], Margareth Gonçalves Simões[7], Maria Angelica de Andrade Leite[8], Maria Lucrecia Gerosa Ramos[9], Ricardo Yassushi Inamasu[10], Ricardo Fonseca Araujo[11], Ronaldo Pereira de Oliveira[12], Thiago Teixeira Santos[13], Walter Quadros Ribeiro Junior[14]

[1] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, paulo.herrmann@embrapa.br*
[2] *Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alberto.bernardi@embrapa.br*
[3] *Analista, Embrapa Gerência-Geral de Tecnologia da Informação, Brasilia (DF), Brasil, breno.assuncao@embrapa.br*
[4] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, carlos.vaz@embrapa.br*
[5] *Pesquisador, Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas (MG), Brasil, evandro.mantovani@embrapa.br.*
[6] *Pesquisadora, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, juliana.yassitepe@embrapa.br*
[7] *Pesquisadora, Embrapa Solos, Rio de Janeiro (RJ), Brasil, margareth.simoes@embrapa.br*
[8] *Pesquisadora, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, angelica.leite@embrapa.br*
[9] *Professora Titular, Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasilia (DF), Brasil, lucrecia@unb.br*
[10] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, ricardo.inamasu@embrapa.br*
[11] *Analista, Embrapa Gerência-Geral de Tecnologia da Informação, Brasilia (DF), Brasil, ricardo.araujo@embrapa.br*
[12] *Pesquisador, Embrapa Solos, Rio de Janeiro (RJ), Brasil, ronaldo.oliveira@embrapa.br.*
[13] *Pesquisador, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, thiago.santos@embrapa.br*
[14] *Pesquisador, Embrapa Cerrados, Brasilia (DF), Braisl, walter.quadros@embrapa.br*

RESUMO

O presente trabalho apresenta um panorama da situação atual dos novos métodos de fenotipagem de plantas no Brasil e no mundo, a partir de 2008 até 2024, que é considerado complementar a genotipagem e a agricultura de precisão. Ressalta-se que o crescimento dessa área ocorreu tanto no desenvolvimento de infraestrutura por instituições de ciência e tecnologia quanto na geração do conhecimento, sendo que, neste período, o fator h foi de 162 (publicação/citação). Em 2008, eram seis Institutos de Ciência e Tecnologia (ICTs), e, em 2023, já são 43 novas instituições de pesquisa e desenvolvimento, sendo 15 do setor privado, bem como a criação de redes nacionais e internacionais, quanto à geração de conhecimento. A ciência de plantas e ciências agrárias está no centro dos principais desafios para as sociedades globais. O melhoramento de plantas não tem mantido o ritmo do aumento de produtividade; assim, esforços urgentes se fazem necessários para impulsionar o setor. A Embrapa, como instituição de pesquisa na agricultura tropical, vem apresentando várias ações estratégicas nessa direção, mas um novo salto deve ser dado, com a criação de uma política de Estado, que possibilite o estabelecimento de infraestrutura adequada para o treinamento de RH altamente qualificado e a logística para um país de dimensões continentais como o Brasil. A multidisciplinaridade advinda de expertises em planta, geociência, ciência da computação, agricultura de precisão e agricultura digital, e instrumentação são condições *sine qua non* para essa nova abordagem.

Palavras-chave: novos métodos de fenotipagem de plantas; bioeconomia; melhoramento de plantas; política de Estado; meio ambiente.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000087

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

ABSTRACT

The present work presents an overview of the current situation of new plant phenotyping methods in Brazil and around the world from 2008 to 2024, which is considered complementary to genotyping and precision agriculture. It should be emphasized that the growth of this area occurred both in the development of infrastructure by science and technology institutions and in the generation of knowledge; in this period, the h factor was 162 (publication/citation). In 2008 there were 6 (ICTs) and by 2023, there were 43 new research and development institutions and 15 from the private sector, as well as the creation of national and international networks regarding the generation of knowledge. Plant science and agricultural sciences are at the center of the main challenges for global societies. Plant breeding has not kept pace with increased productivity, so urgent efforts are needed to boost the sector. Embrapa, as a research institution in tropical agriculture, has been presenting several strategic actions in this direction. However, a new leap must be taken in creating a State policy that allows the establishment of adequate infrastructure for the training of highly qualified HR and logistics for a country of continental dimensions. The multidisciplinary approach arising from plant expertise, geoscience, computer science, precision agriculture, and digital and instrumentation are sine qua nonconditions for this new approach.

Keywords: new plant phenotyping methods; bioeconomy; plant breeding; state policy; environment.

1 BREVE INTRODUÇÃO E HISTÓRICO

As novas ferramentas provenientes da instrumentação, da automação, da agricultura de precisão e digital, da ciência de dados e dos métodos quantitativos são consideradas importantes e possibilitam a investigação em novos métodos de fenotipagem de plantas (FP) de forma não invasiva e de alto desempenho. A FP é entendida como estudo do comportamento da planta, permitindo a quantificação não invasiva da estrutura e da função, tanto das características fisiológicas da parte aérea quanto da raiz, e da sua relação com o meio ambiente em complexa transformação (Pieruschka; Schurr, 2019; Araus et al., 2018 Watt et al., 2020; Kaiser et al., 2024). A FP de alta eficiência pode ser utilizada não somente como ferramenta em programas de melhoramento, genômica e estudos fisiológicos/mecanismos de tolerância mas também para validar manejos de solo e plantas que diminuam os efeitos da seca, que poderiam ser utilizados em experimentos com manejos, como, por exemplo, o biochar (Batool et al., 2015), a gessagem para aumentar o sistema radicular em solos com alumínio tóxico (Shafiq et al., 2021), os polímeros superabsorventes (Pereira et al., 2022), a aplicação de silício (Verma et al., 2022) e *water slope gradient* (Bagula et al., 2022) são alguns dos exemplos apresentados.

Em um levantamento feito pela empresa Keygenes, foi mostrada a diferença de tempo que ocorre entre o melhoramento clássico e o uso da nova fenotipagem de plantas, a fenômica, bem como a utilização das técnicas avançada de genotipagem. Neste trabalho, verificou-se essa diferença, e o tempo, para algumas culturas, que é em torno de 10 anos, pode ser reduzido, entre a pesquisa e a comercialização, em 5,5 anos (Van Tunen, 2016).

O mercado global estimado de sementes deverá atingir o valor de US$ 71,53 billhões em 2022. Projeções para 2028 apontam uma taxa de crescimento anual composto de 6,3%, atingindo valores em torno de US$ 103,4 bilhões (Research and Market, 2022). A América Latina estava ocupando o segundo lugar na taxa de crescimento anual composta (%), no período entre 2012 e 2018. O Brasil mantém o terceiro maior banco ativo de germoplasma (BAG) do mundo, e o maior da América Latina. O BAG brasileiro contém cerca de 120 mil amostras no total. Desse total, 14 mil acessos são de feijão, 27 mil de arroz, 4 mil de milho, 7, 2 mil de sorgo, 2 mil de milheto e 35 mil são de soja, entre acessos de espécies (cultivadas e selvagens) (Pádua et al., 2020). Apenas para soja, há 1.500 acessos selvagens e somente esse fator já demonstraria o impacto da investigação do comportamento da planta em condições tão adversas, advindas dos diferentes biomas do nosso país. E, desta forma, dá-se a agregação de valor à semente.

Assim, pode-se observar que a aplicação dos novos métodos de FP, juntamente com a genética, apresenta um espaço ilimitado da pesquisa (P), do desenvolvimento (D) e da inovação (I), e que, em função da sua utilização, poderá impactar significativamente o tempo do desenvolvimento de novos cultivares até a comercialização, e gerar novos conhecimentos (Pieruschka; Schurr, 2019; Watt et al., 2020; Kaiser et al., 2024), apresentando novas oportunidades na bioeconomia (Herrmann et al., 2019).

Uma visão holística da FP, que seja por intermédio da multidisciplinaridade, da automação, da agricultura de precisão, da agricultura digital, da ciência de dados, dos métodos quantitativos e da genotipagem de plantas, devem ser condições *sine qua non* na pesquisa agropecuária brasileira, não visando só à produtividade, mas também à geração de conhecimento.

2 DESAFIOS E CENÁRIOS QUE SE APRESENTAM PARA AS PRÓXIMAS DUAS DÉCADAS

Demorou quase dez mil anos para que os seres humanos produzissem globalmente 1,0 bilhão de toneladas de alimentos. A Revolução Verde levou a uma duplicação desse montante em apenas 40 anos, que ocorreu entre 1960 e 2000. Um dos principais impulsionadores da Revolução Verde foi a introdução dos chamados genes semianões (altura reduzida, genes Rht) no trigo (Voss-Fels et al., 2019).

O milênio recorde de secas em 1996/97, 2001-2003, 2006 e 2018 na Austrália ou 2003, 2010, 2015 e 2018 na Europa são exemplos de efeitos extremos da seca na produção agrícola (Voss-Fels et al., 2019).

Prevê-se que, em média, os rendimentos globais das principais culturas serão reduzidos em 6,0% no trigo, 3,2% no arroz, 7,4% no milho e 3,1% na soja para cada grau Celsius de aumento na temperatura média global (Zhao et al., 2017).

Apesar dos importantes avanços agrícolas para alimentar o mundo nos últimos 60 anos, um novo estudo mostra que a produtividade agrícola global é 21% menor do que poderia ter sido sem as mudanças climáticas. Isso equivale a perder cerca de sete anos de aumento de produtividade agrícola desde a década de 1960 (Ortiz-Bobea et al., 2021).

Há uma reconhecida necessidade de acelerar os ganhos genéticos junto aos programas de melhoramento de plantas em todo o mundo. A Tabela 1 apresenta uma síntese do trabalho de Jarquín e colaboradores (Jarquín et al., 2017) mostrando que o modelamento e a análise da resposta do genótipo em função do ambiente (G × E) podem acelerar o ganho, melhorando a acurácia do modelo de predição genômica. Segundo esse modelo, o aumento na predição se dá em função do coeficiente de variação (CV) obtido para o experimento com a inclusão de 100 linhas e 26 ambientes e 200 linhas e 17 ambientes.

No futuro, o sequenciamento do genoma de coleções inteiras de germoplasma presentes em bancos de germoplasma, com consequente associação com fenótipos, deverá ser um componente primário para todos os programas de melhoramento de culturas (Varshney et al., 2020).

Tabela 1. Síntese do resultados apresentados por Jarquín e colaboradores em trabalho de 2017.

		L+E	L+E+G	L+E+(GXE)
100 L e 26 E	L+E+G	↑1,5%	0,403 (CV)	↑13,9%
200 L e 17 E	L+E+G	↑1,5%	0,472 (CV)	↑14,4%

L= Linhas; E= Ambientes e G= Genótipo.

2.1 A importância da Fenotipagem Digital e Alto Desempenho e sua complementariedade com a Agricultura de Precisão e Digital

Os novos métodos de fenotipagem de plantas de alto desempenho atrelados às tecnologias genéticas que estão sendo propostas serão úteis na investigação dos *traits* de interesse advindo do comportamento da planta. Estes estão relacionadas às características fisiológicas de parte aérea e raiz, sendo influenciados por um ambiente em complexa transformação (Zhu et al., 2020; Costa et al., 2019).

As novas ferramentas e os novos métodos de fenotipagem de plantas (FP), provenientes da instrumentação, da automação, da agricultura de precisão e digital, da ciência de dados e dos métodos quantitativos, são considerados de rupturas e possibilitam a investigação de forma não invasiva, não destrutiva e de alto desempenho. Uma análise do passado, do presente e do futuro da fenotipagem de plantas é apresentado por Pieruschka e Schurr (2019) e Kaiser et al. (2024).

Com as novas tecnologias e os métodos de fenotipagem de plantas, há a tendencia na melhoria do ganho genético (Gy). As oportunidades de melhoria são apresentadas por Watt e colaboradores em seu artigo de 2020 (Watt et al., 2020).

2.1.1 Impactos científicos e tecnológicos da área de fenotipagem de plantas

Do ponto de vista técnico-científico, verifica-se que o número de publicações, dos últimos 30 anos (1991 até 2023), cresceu exponencialmente, saindo de uma publicação em 1991 e alcançando a marca de 643 publicações por ano, em 2023. A Figura 1 apresenta em formato gráfico os números obtidos junto ao banco de dados da Clarivate, Web of Science, em abril de 2024, em que se apresenta a evolução anual, tanto do número de publicações como de citações. Nesse período, foram publicados 5.017 artigos em revistas internacionais. Em termos de citações, nota-se que no ano de 1996 ocorreram apenas duas citações, enquanto que em 2023 chegou-se acumuladamente à marca de 26.885 citações, o que confere um fator h da ordem de 162; note-se que esse mesmo fator em 2017 foi de 81. O total para esse período de 26 anos foi de 93.452 citações. Isto mostra, portanto, que essa área está crescendo nos últimos 12 anos, tanto em termos de número de publicações como de citações.

Utilizando o mesmo termo adotado acima e observando a proveniência dessas publicações e citações linkando os artigos vindos que tenham saído das pesquisas provenientes da Embrapa, verifica-se que, desde 2015 até 2023, já há um total de 41 publicações em revistas internacionais indexadas.

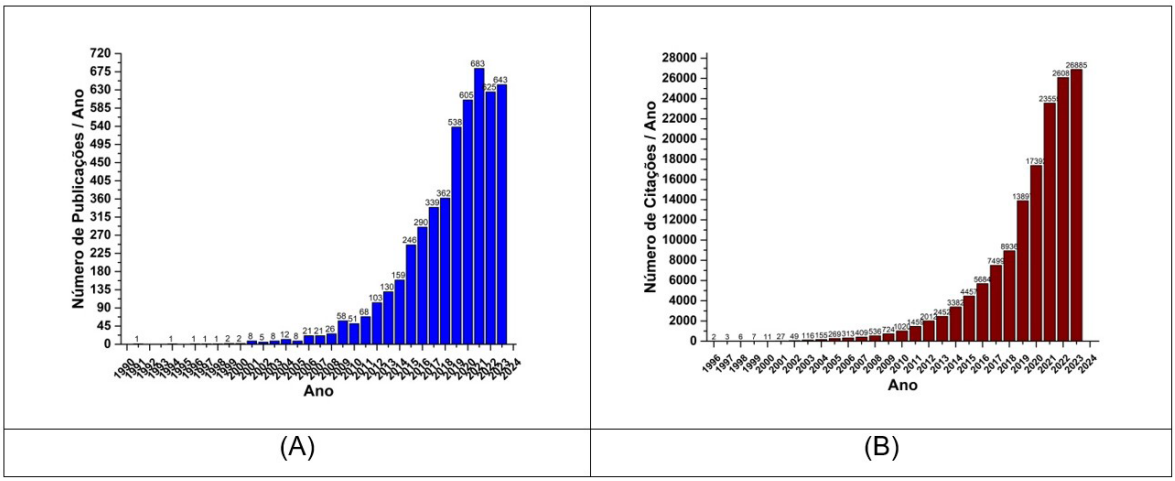


Figura 1. Gráfico com o resultado de busca do número de (A) publicações e (B) citações anualmente por intermédio da palavra-chave "Plant Phenotyping" em tópicos. A ferramenta utilizada para a busca foi o "Web of Science" da Thomas Reuters.

Ressalte-se que esses mesmos trabalhos enfatizam a aplicação de ferramentas como os novos métodos de fenotipagem de plantas. Além do corpo de pesquisadores das unidades que participam do grupo de pesquisa Rede Brasileira de Fenotipagem de Plantas (RBFP), observa-se, pelas publicações acima, que já há dez unidades desenvolvendo atividades, gerando resultados e inovação para a área. Seguem abaixo as unidades da Embrapa que estão publicando trabalhos em revistas especializadas, com parcerias nacional e internacional: - Embrapa Agroenergia; - Embrapa Agricultura Digital; - Embrapa Arroz e Feijão; - Embrapa Instrumentação; - Embrapa Cerrados; - Embrapa Gado de Corte; - Embrapa Mandioca e Fruticultura; - Embrapa Milho e Sorgo; - Embrapa Meio Norte; - Embrapa Trigo, e - Embrapa Soja. Quanto ao fator h para as publicações da Embrapa, no tema, utilizando o banco de dados da Web of Science, obteve-se que, em 2015, esse fator era de 2, e em 2023, o seu h foi para 13, mostrando o crescimento tanto em número de citações como de publicações no periodo.

Pela Base *Derwent*", para o mesmo termo usado no Web of Science ("Topic: plant phenotyping"), na data 06/02/2021, obteve-se um total de 80 patentes desde 1998, sendo que 70 das mesmas estão relacionadas à área de instrumentação e 62 delas estão ligadas à agricultura. A Embrapa Soja, juntamente com um grupo da Argentina, possui uma patente internacional, desde 2012, denominada *Automatic phenotyping platform for plants suffering from water deficit, has weighing unit, irrigation unit and image capture unit that are connected to central computer to store received data, and to vary activation times of irrigation*, com o número de patente WO2012042084-A1.

A Figura 2 apresenta uma comparação do tema fenotipagem com outras áreas. Pode ser verificado que o mesmo começou a se destacar a partir de 2005, ultrapassando as demais áreas, de forma comparativa, em 2012. A frequência de publicações é uma normalização relacionando o número de publicações daquele ano, utilizando a base de dados *Scopus*, pelo número de habitantes do Planeta Terra naquele ano (Costa et al., 2019).

Na Figura 3 (A) e (B), é apresentada a evolução referente à relação do número de institutos de ciência e tecnologia, bem como a formação de redes nacionais e internacionais de pesquisas, com os novos métodos de fenotipagem de plantas (NMFP). A Austrália foi pioneira nos NMFPs, inaugurando em 2007, a *Australian Plant Phenomics Facility* (APPF). A partir daí, vários trabalhos vêm sendo realizados. O exemplo de maior sucesso foi o trigo geneticamente modificado, o qual apresentou ganhos de rendimento entre 20 a 30% (Braidotti, 2019). De acordo com a Rede Internacional de Fenotipagem de Plantas (IPPN), em 2021, o número de sócios era de 41 instituições da academia, 12 empresas da iniciativa privada, sendo que seis são *clusters* de diversos países.

No âmbito da Embrapa, em 2022, foi realizado um levantamento dos projetos que estivessem tratando de novos métodos de fenotipagem por meio de uma busca nos campos de título de projetos, atividades e palavras-chave, utilizando o *software* corporativo Quaesta (Dias et al., 2017), que realiza buscas de expressões de texto, em projetos em execução, armazenados na base de projetos Sistema Embrapa de Gestão, imple-

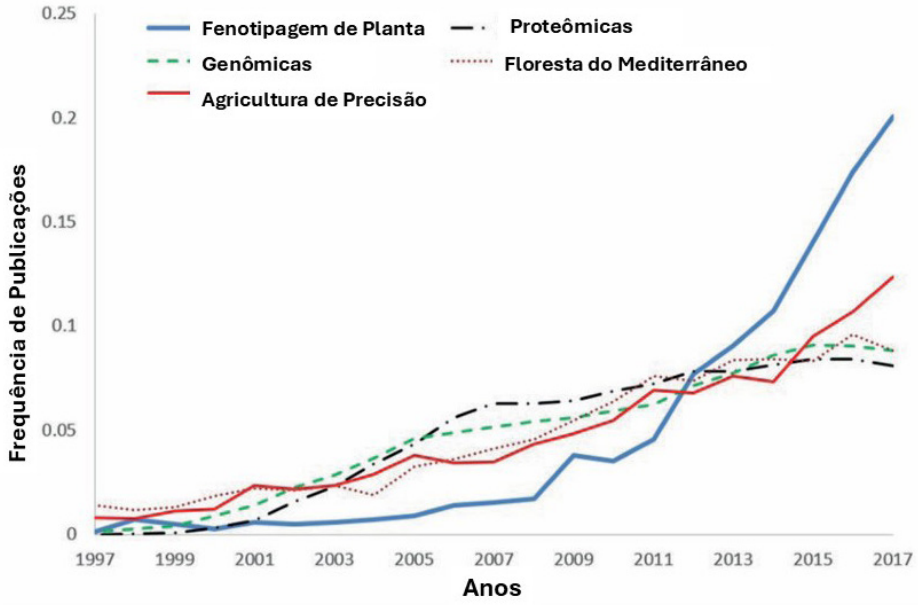


Figura 2. Frequência de publicações em fenotipagem de plantas de 1997 até 2017, comparado com outros temas: Genômica, Proteômica, Floresta do Mediterrâneo e Agricultura de Precisão (Costa et al., 2019).

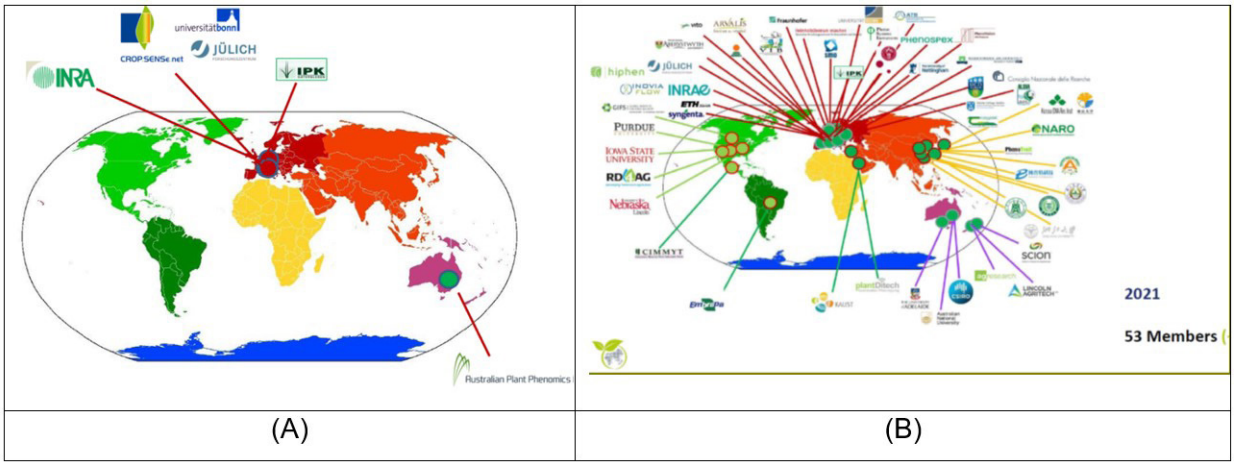


Figura 3. Mapa global da evolução e distribuição das redes nacionais e internacionais de fenotipagem de plantas por países e instituições em 2008 (A) e 2021 (B).

mentado por meio do *software* corporativo Ideare[1] . Observou-se uma distribuição grande no número de projetos em execução, que possuem "Atividades – Descrição", relativos ao termo de busca "fenotipagem de plantas", agrupados em 34 diferentes Portfólios[2] da Embrapa, sendo que o maior número de projetos está no Portfólio Bioinsumos (105), seguido pelo Portfólio Grãos (89) e Automação (88). A Figura 4 apresenta a distribuição de números de projetos em execução, por portfólios, que possuem na sua "Atividade-Descrição" a palavra-chave "Fenotipagem de plantas", utilizando o Questa como ferramenta de busca.

[1] Disponível em: https://sistemas.sede.embrapa.br/ideare/. Acesso restrito aos empregados da Embrapa.

[2] Portfólios são instrumentos de apoio gerencial para organização de projetos da Embrapa em temas estratégicos. A missão dos portfólios é direcionar a produção de soluções em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) para demandas nacionais e suas interfaces com as demandas regionais. Para isso, são consideradas as megatendências apontadas para a agricultura brasileira, bem como forças modeladoras do futuro. Tais ferramentas têm os objetivos de assegurar a melhoria contínua da sua programação, reduzir redundâncias, maximizar o uso dos recursos públicos e possibilitar maior coordenação dos esforços e das suas competências. Disponível em: https://www.embrapa.br/pesquisa-e-desenvolvimento/portfolios. Acesso em: 13 ago. 2022.

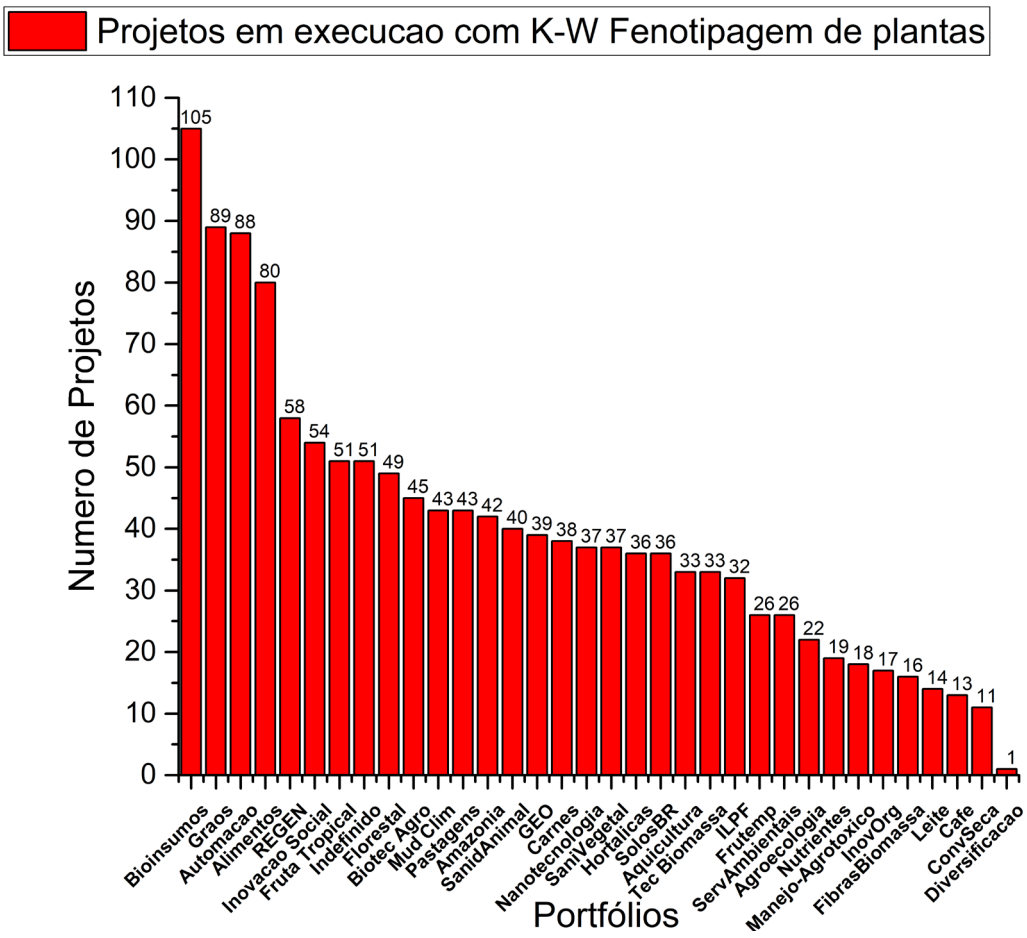


Figura 4. Distirbuiçao de projetos em execução, nos Portfólios da Embrapa, que possuem na sua "Atividade-Descrição" a palavra-chave "Fenotipagem de plantas".

3 AÇÕES QUE JÁ FORAM E QUE VÊM SENDO REALIZADAS PELA EMBRAPA NA ÁREA DE FENOTIPAGEM DE PLANTAS

Em um cenário de mudanças climáticas globais e necessidade de preservação do uso de recursos naturais, que se tornam cada vez mais escassos, pode ocorrer a redução na produtividade das principais culturas agrícolas o que representa um risco para o agronegócio e a segurança alimentar mundial. Neste contexto, para que a Embrapa se mantenha na vanguarda do desenvolvimento de cultivares de plantas que otimizem o uso dos recursos naturais disponíveis e sejam resistentes aos principais tipos de estresses abióticos, tais como temperaturas elevadas, intensidade luminosa e escassez de água no solo, é necessário o emprego das técnicas de fenotipagem de alto desempenho que utilizam as tecnologias digitais para acelerar o desenvolvimento de novas cultivares. Para atingir este objetivo, a Embrapa tem se envolvido em várias iniciativas, visando alavancar a fenotipagem de alto desempenho na empresa, conforme listado a seguir:

- Iniciado em 2004: *Drought Phenotyping Network* (*Generation Challenge Program*);
- Desenvolvida a Plataforma SITIS de fenotipagem da Embrapa Arroz e Feijão;
- No fim de 2017, a parceria entre a Embrapa, a Unicamp e a FAPESP criou o Centro de Pesquisa em Genômica Aplicada às Mudanças Climáticas (*Genomics for Climate Change Research Center* - GCCRC), unindo competências das duas primeiras instituições em biotecnologia agrícola. O Centro oferece um laboratório de fenotipagem em condições de ambiente controlado e uma moderna casa de vegetação (Yassitepe et al., 2020);
- Instalação entre outubro de 2012 e outubro de 2015 do Labex Embrapa Europa, posto avançado Alemanha no Forschungzentrum Jülich, IBG 2: Ciência de Plantas - Jülich, Alemanha;
- Contemplado no documento da Agropensa: O Futuro de Desenvolvimento Tecnológico da Agricultura Brasileira – Visão 2014 - 2034;

- O tema FP foi escolhido como uma das áreas do Programa de Pós-graduação e Cientista Visitante da Embrapa, em 2014;
- Foi realizado o *Workshop Phenotyping for the Future*, Embrapa Sede, Brasília-DF, 17/09/13;
- Foi realizado o *Embrapa Plant Phenotyping Workshop* (*Past, Present and Future*), Embrapa Sede, Brasília-DF, 02 a 04/09/2014;
- Criação junto ao grupo de pesquisa do CNPq, em dezembro de 2014, da Rede Brasileira de Fenotipagem de Plantas, com 53 pesquisadores cadastrados de 15 unidades descentralizadas da Embrapa e três ICTs. Conta com 19 linhas de pesquisa, 18 estudantes, cinco Intuições Internacionais. (http://dgp.cnpq.br/dgp/espelhogrupo/7628749066451461. Acesso em: 13 ago. 2022.);
- Envio de Carta-Consulta para Arranjo, na Embrapa, com o título Plataforma de Fenotipagem de Plantas para a Agricultura, enviado ao CGP no dia 11 de setembro de 2015;
- Aprovação do arranjo Métodos e técnicas modernas visando a fenotipagem de plantas para o avanço da agricultura (FPAgro), em junho de 2017;
- Realização da *II Latin-American Conference on Plant Phenotyping and Phenomics for Plant Breeding*, que ocorreu de 20 a 22 de setembro de 2017, na Embrapa Instrumentação, São Carlos-SP, contando com a participação de 83 pessoas de 12 países. A programação contou com seis *Key Speakers*, 16 Apresentações Orais, 41 pôsteres e um *Proceedings* publicado, com 57 resumos. (https://www.cnpdia.embrapa.br/eventos/laphpb/. Acesso em: 13 ago. 2022.);
- Publicação no BCA da Embrapa, número 32, do dia 20/06/2018, a transformação em portfólio do arranjo Métodos e Técnicas Modernas, visando a Fenotipagem de Plantas para o Avanço da Agricultura (FPAgro) e nomeando o seu comitê gestor;
- A Embrapa foi votada na assembleia geral (AG) do IPPN como membro associado do *International Plant Phenotyping Network* (*IPPN*), com sede na cidade de Juelich, na Alemanha. A AG, que votou as indicações, ocorreu na cidade de Adelaide, Austrália, no dia 01/10/2018;
- No livro organizado pelo ex-Ministro Roberto Rodrigues, com o título Agro e Paz – Análises e propostas para o Brasil alimentar o mundo, de 2018 (http://www.esalq.usp.br/biblioteca/pdf/AgroePaz.pdf), que apresenta um Plano de Estado (horizonte 2030-três governos) do Brasil para o mundo, em Segurança Alimentar, os novos métodos de fenotipagem de plantas está descrito no capítulo Tecnologia e Inovação no Agro, organizado e redigido pelo Dr. Silvio Crestana;
- Em fevereiro de 2019, com a modificação no número de portfólios da Embrapa, o FPAGro se associou ao recém-criado Portfólio Automação, Agricultura de Precisão e Digital, sendo que um desafio de inovação (DI) desse portfólio é: Viabilizar ferramentas de fenotipagem de alta resolução e automação para uso no melhoramento de bovinos, milho, soja e cana-de-açúcar tolerantes aos fatores bióticos e abióticos;
- A Embrapa participa do *steering committe* do grupo de trabalho *Controlled Environment Plant Phenotyping* (*CePPG*) (https://www.plant-phenotyping.org/index.php?index=682), do IPPN, desde 2020. Em maio de 2022, o grupo de trabalho organizou o *IPPN-CEPPG Workshop on Environment Plant Phenotyping* (https://meetings.ipk-gatersleben.de/ceppg2022/. Acesso em: 13 ago. 2022.);
- O número de projetos da Embrapa, que possui entre as suas atividades a aplicação de drones em fenotipagem de plantas de alto desempenho – busca em que foi utilizada a ferramenta "Questa" da Embrapa –, passou de uma atividade no ano de 2015 para dez, em 2023.

4 DESAFIOS FUTUROS

A área de fenotipagem de alto rendimento assume grande importância no melhoramento genético de plantas, uma vez que, com o uso das tecnologias digitais que automatizam o monitoramento das câmaras de crescimento e dos experimentos realizados em campo, pode acelerar as pesquisas de novas cultivares de culturas agrícolas mais resistentes ao estresse causado pelas mudanças climáticas, representado por altas temperaturas e longos períodos de restrição hídrica.

De acordo com Yassitepe et al., 2020, técnicas de fenotipagem mais precisas e em larga escala podem e devem ser empregadas visando acelerar a disponibilização de genótipos adaptados às condições regionais específicas, modificadas pelas alterações recentes no clima. As novas tecnologias estão sendo empregadas para incrementar a quantidade, a qualidade e a pluralidade dos caracteres medidos e permitir, com o apoio de análises estatísticas modernas, a distinção de efeitos fenotípicos.

Ainda existem muitos desafios na área de fenotipagem a serem trabalhados na Embrapa, como os listados a seguir:

- Apenas para soja, há 1.500 acessos que são selvagens e somente esse fator já demonstraria o impacto da investigação do comportamento da planta em

condições tão adversas como as advindas dos diferentes biomas do nosso País; desta forma, dá-se a agregação de valor à semente;

- Reduzir a diferença de tempo entre o melhoramento clássico e o uso da nova fenotipagem de plantas, a fenômica, bem como a utilização das técnicas avançadas de genotipagem, que varia entre 10 e 15 anos, para determinadas culturas, em aproximadamente 5,5 anos. Esse tempo é relacionado entre a pesquisa e acomercialização;
- Os programas de melhoramento no desenvolvimento de cultivares tolerantes a estresses bióticos e abióticos. O caráter não destrutivo, minimamente invasivo e automatizado das medidas possibilitará identificar indivíduos superiores em gerações segregantes, preservando-os, além de permitir uma pressão de seleção maior, devido à acurácia do processo como um todo. Em conjunto com a genômica, a proteômica e a metabolômica, possibilitarão a redução do número de experimentos em ambientes contrastantes, abreviando o processo de melhoramento;
- A aplicação dos novos métodos e técnicas, comos drones, aprendizado de máquina, *Deep Learning*, robôs, sensores, biosensores e automação à fenotipagem, juntamente com Genotipagem de alto desempenho, deverão permitir economia de tempo, maior precisão e segurança no diagnóstico, investigação da estrutura e função, redução do número de medidas destrutivas, bem como dos erros sistemáticos e aleatórios dos experimentos, entre outros;
- Formação de recursos humanos, contemplando a multidisciplinaridade e a interinstitucionalidade;
- Fortalecimento da colaboração nacional e internacional para trabalhos conjuntos e unificação de protocolos comuns;
- Estabelecimento de parcerias com a iniciativa privada;
- *Data Management* aplicado aos novos métodos de fenotipagem de plantas;
- A integração da Fenotipagem, da Genotipagem, das ferramentas da Agricultura de Precisão e Agricultura Digital serão condições *sine qua non* na busca do conhecimento, da sustentabilidade, da tomada de decisão, da inovação e da produtividade.

AGRADECIMENTOS

Projeto Agricultura de Precisão (AP) para sustentabilidade do sistema produtivo agrícola, pecuário e florestal brasileiro, número 01.14.09.001.04.04 e Portfólio Automação e Agricultura de Precisão e Digital. Projeto Embrapa número 20.22.01.001.00 – Melhoramento genético de trigo para o Brasil - 2023 a 2026.

REFERÊNCIAS

ARAUS, J. L.; KEFAUVER, S. C.; ZAMAN-ALLAH, M.; OLSEN, M. S.; CAIRNS, J. E. Translating high-throughput phenotyping into genetic gain. **Trends in Plant Science**, v. *23*, n. 5, p. 451-466, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.02.001.

BAGULA, E. M.; MAJALIWA, J. M.; BASAMBA, T. A.; MONDO, J. M.; VANLAUWE, B.; GABIRI, G.; TUMUHAIRWE, J.; MUSHAGALUSA, G. N.; MUSINGUZI, P.; AKELLO, S.; EGERU, A.; TENYWA, M. M. Water use efficiency of maize (Zea mays L.) crop under selected soil and water conservation practices along the slope gradient in Ruzizi Watershed, Eastern D.R. Congo. **Land (Basel)**, v. *11*, n. 10, p. 1833, 2022. DOI: http://doi.org/10.3390/land11101833.

BATOOL, A.; TAJ, S.; RASHID, A.; KHALID, A.; QADEER, S.; SALEEM, A. R.; GHUFRAN, M. A. Potential of soil amendments (Biochar and Gypsum) in increasing water use efficiency of Abelmoschus esculentus L. Moench. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, n. 733, 2015. DOI: http://doi.org/10.3389/fpls.2015.00733

BRAIDOTTI, G. **'Over expression' of three wheat genes linked to yield gains**. 2019. Disponível em: https://groundcover.grdc.com.au/crops/cereals/new-genetic-pathways-to-increase-wheat-yields. Acesso em: 13 ago. 2022.

COSTA, C.; SCHURR, U.; LORETO, F.; MENESATTI, P.; CARPENTIER, S. Plant phenotyping research trends, a science mapping approach. **Frontiers in Plant Science**, v. *9*, p. 1933, 2019. DOI: http://doi.org/10.3389/fpls.2018.01933.

DIAS, F. R. T.; CAMPOS, M. M.; FIGUEIREDO, M. C. B.; MATSUURA, M. I. da S. F. **Oportunidades em avaliação de ciclo de vida nos projetos da Embrapa usando o software Quaesta**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2017. 13 p. (Embrapa Pantanal. Documentos, 149). Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181406/1/DOC-149-completo-Embrapa-Pantanal-2.zip. Acesso em: 07 out. 2022.

RESEARCH AND MARKETS. **Global seeds market:** trends and forecast analysis till 2028 (by type, crop type, distribution channel, by region, by country), 2022. Disponível em: https://www.researchandmarkets.com/reports/5680917/global-seeds-market-2022-edition--trends-and#src-pos-4. Acesso em: 13 ago. 2022.

HERRMANN, P. S. P.; CRESTANA, S.; RIBEIRO JUNIOR, W. Q.; SOUSA, C. A. F.; SANTOS, T. T.; LANNA, A. C. Cenário atual dos novos métodos de fenotipagem de plantas e urgência nas ações de imersão do brasil na era da bioeconomia. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 2019, Sao Carlos. **Anais** [...]. São Carlos: Embrapa, 2019. p. 289-294.

JARQUÍN, D.; LEMES DA SILVA, C.; GAYNOR, R. C.; POLAND, J.; FRITZ, A.; HOWARD, R.; BATTENFIELD, S.; CROSSA, J. Increasing genomic-enabled prediction accuracy by modeling genotype × environment interactions in Kansas wheat. **The Plant Genome**, v. *10*, n. 2, p. plantgenome2016.12.0130, 2017. DOI: http://doi.org/10.3835/plantgenome2016.12.0130.

KAISER, E.; VON GILLHAUSSEN, P.; CLARKE, J.; SCHURR, U. Editorial: IPPS 2022 - plant phenotyping for a sustainable future. **Frontiers in Plant Science**, v. *15*, p. 1383766, 2024. DOI: http://doi.org/10.3389/fpls.2024.1383766.

ORTIZ-BOBEA, A.; AULT, T. R.; CARRILLO, C. M.; CHAMBERS, R. G.; LOBELL, D. B. Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. **Nature Climate Change**, v. *11*, n. 4, p. 306-312, 2021. DOI: http://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1.

PÁDUA, J. G.; ALBUQUERQUE, M. S. M.; DE MELO, S. C. M. **Bancos e coleções de germoplasma da Embrapa:** conservacao e uso. Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2020. 167 p. (Séries Documentos 371).

PEREIRA, L. F.; RIBEIRO JÚNIOR, W. Q.; RAMOS, M. L. G.; SOARES, G. F.; LIMA GUIMARÃES, C.A. The impact of polymer on the productivity and photosynthesis of soybean under different water levels. **Agronomy (Basel)**, v. *12*, n. 11, p. 2657, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy12112657.

PIERUSCHKA, R.; SCHURR, U. Plant phenotyping: past, present, and future. **Plant Phenomics**, v. *26*, p. 7507131, 2019. DOI: http://doi.org/10.34133/2019/7507131.

SHAFIQ, B. A.; NAWAZ, F.; MAJEED, S.; AURANGZAIB, M.; MAMUN, A. A.; AHSAN, M.; AHMAD, K. S.; SHEHZAD, M. A.; ALI, M.; HASHIM, S.; HAQ, T. U. Sulfatebased fertilizers regulate nutrient uptake, photosynthetic gas exchange, and enzymatic antioxidants to increase sunfower growth and yield under drought stress. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. *21*, n. 3, p. 2229-2241, 2021. DOI: http://doi.org/10.1007/s42729-021-00516-x.

VARSHNEY, R. K.; SINHA, P.; SINGH, V.; KUMAR, A.; ZHANG, Q.; BENNETZEN, J. L. 5Gs for crop genetic improvement. **Current Opinion in Plant Biology**, v. *56*, p. 190-196, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.12.004.

VERMA, K. K.; SONG, X. P.; LIN, B.; GUO, D. J.; SINGH, M.; RAJPUT, V. D.; SINGH, R. K.; SINGH, P.; SHARMA, A.; MALVIYA, M. K.; CHEN, G. L.; LI, Y. R. Silicon induced drought tolerance in crop plants: physiological adaptation strategies. **Silicon**, v. *14*, n. 6, p. 2473-2487, 2022. DOI: http://doi.org/10.1007/s12633-021-01071-x.

VOSS-FELS, K. P.; STAHL, A.; HICKEY, L. T. Q&A: modern crop breeding for future food security. **BMC Biology**, v. *17*, n. 1, p. 18, 2019. DOI: http://doi.org/10.1186/s12915-019-0638-4.

WATT, M.; FIORANI, F.; USADEL, B.; RASCHER, U.; MULLER, O.; SCHURR, U. Phenotyping: new windows in to the plant for breeders. **Annual Review of Plant Biology**, v. *71*, n. 1, p. 689-712, 2020. DOI: http://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042916-041124.

YASSITEPE, J.E. de C. T.; DANTE, R. A.; GERHARDT, I. R.; FERNANDES, F. R.; SOUZA, R. S. C. de; ARMANHI, J. S. L.; SILVA, V. C. H. da; RIBEIRO, A. P.; SILVA, M. J. da; ARRUDA, P. Genômica aplicada às mudanças climáticas: biotecnologia para a agricultura digital. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (Eds.). **Agricultura digital:** pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF: Embrapa, 2020. cap. 11, p. 258-276.

ZHAO, C.; LIU, B.; PIAO, S.; WANG, X.; LOBELL, D. B.; HUANG, Y.; HUANG, M.; YAO, Y.; BASSU, S.; CIAIS, P.; DURAND, J.-L.; ELLIOTT, J.; EWERT, F.; JANSSENS, I. A.; LI, T.; LIN, E.; LIU, Q.; MARTRE, P.; MÜLLER, C.; PENG, S.; PEÑUELAS, J.; RUANE, A. C.; WALLACH, D.; WANG, T.; WU, D.; LIU, Z.; ZHU, Y.; ZHU, Z.; ASSENG, S. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. *114*, n. 35, p. 9326-9331, 2017. DOI: http://doi.org/10.1073/pnas.1701762114.

ZHU, X.; ORT, D. R.; PARRY, M. A. J.; CAEMMERER, S. V. A wish list for synthetic biology in photosynthesis research. **Journal of Experimental Botany**, v. *71*, n. 7, p. 2219-2225, 2020. DOI: http://doi.org/10.1093/jxb/eraa075.

Mirã 2.0 – Plataforma Robótica Agrícola para monitoramento das condições do solo em culturas de soja no Brasil

7

Mirã 2.0 – Agricultural Robotic Platform for monitoring soil condition of soya crops in Brazil

Andres Eduardo Baquero Velasquez[1], Vitor Akihiro Hisano Higuti[2], Mateus Valverde Gasparino[3], Leonardo Bonacini[4], Daniel Varela Magalhães[5], Marcelo Becker[6], Débora Marcondes Bastos Pereira Milori[7]

[1] *Engenheiro Sênior de Robótica Autônoma, Earthsense Inc., Champaign (IL), USA, andres@earthsense.co*
[2] *Engenheiro Chefe de Robótica Autônoma, Earthsense Inc., Champaign (IL), USA, akihiro@earthsense.co*
[3] *Doutorando, Universidade de Illinois em Urbana, Champaign, Urbana (IL), USA, mvalve@illinois.edu*
[4] *Engehneiro Sênior de Robótica Autônoma, Earthsense, Inc., Champaing (IL), USA, leo@earthsense.co*
[5] *Professor, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), Brasil, daniel@sc.usp.br*
[6] *Professor, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), Brasil, becker@sc.usp.br*
[7] *Pesquisadora, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, debora.milori@embrapa.br*

RESUMO

A soja é uma das culturas de maior importância para o Brasil. Por causa disso, tem sido foco de inúmeras pesquisas nos últimos anos. Esta cultura possui algumas doenças que geram grandes perdas financeiras para os agricultores, como, por exemplo, ferrugem, oídio, antracnose e seca da haste e da vagem. Essas doenças podem afetar quase que todo o ciclo de vida do cultivo de soja. Um dos objetivos da agricultura de precisão é a identificação de pragas e doenças para reduzir seu impacto no desenvolvimento das plantas. Fazer o monitoramento do cultivo utilizando apenas força de trabalho humana é inviável devido à grande quantidade de tempo necessária e à baixa precisão. Por causa disso, um cenário promissor é a utilização de um robô móvel com rodas para fazer monitoramento dos campos de soja. Com base neste cenário, o presente trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento da plataforma Mirã 2.0, a qual deve permitir a aquisição de dados em campo para monitorar o solo dos cultivos de soja, utilizando *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*. A plataforma foi projetada e construída considerando as características do cultivo de soja e os desafios da navegação nos ambientes agrícolas. Desta forma, este robô reduz os esforços para realizar o monitoramento do solo em cultivos de soja.

Palavras-chave: agricultura de precisão; robótica móvel; monitoramento do solo.

ABSTRACT

Soya is one of Brazil's most important crops. Because of it, it has been the focus of countless research projects in recent years. This crop has a number of diseases (i.e. rust, powdery mildew, anthracnose and stem and pod dryness) that generate major financial losses for the farmers. These diseases can affect almost the entire life cycle of soya crop. One of the precision agriculture goals is the identification of pests and diseases in order to reduce their impact on plant development. Monitoring crops using only human labor is not feasible due to the large amount of time required and the low level of precision. Because of this, a promising scenario is the use of wheeled mobile robots to monitor the soya fields. Based on this scenario, the aim of this work is to present the development of the Mirã 2.0 platform, which should allow the acquisition of data in the field to be used to monitor the soil of soya crops, using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. This platform was designed and built taking into account the main characteristics of the soya crops and the challenges navigation in agricultural environments. In this way, this robot reduces efforts to perform soil monitoring in soya crops.

Keywords: precision agriculture; mobile robotics; soil monitoring.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000078

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial gera a necessidade do aumento da produção de alimentos, um fator que até hoje tem sido suprido, mas este cenário pode mudar ao longo dos anos (Valin et al., 2014). Este fator fez com que a Agricultura de Precisão (AP) se tornasse popular, pois essa tem por objetivo gerir informações de variabilidade de culturas agrícolas no tempo e no espaço (Cisternas et al., 2020).

Neste contexto, a utilização de robôs na agricultura tem crescido nos últimos anos (Reina et al., 2016). Segundo Yaghoubi et al. (2013), o número de robôs agrícolas está aumentando ao longo dos anos e podem ser utilizados em várias etapas, como, por exemplo, plantio, controle de pestes e colheita.

Apesar de existirem vários robôs sendo desenvolvidos no mundo, apenas alguns são adotados na prática (Bechar; Vigneault, 2016; Sparrow; Howard, 2021). Isso acontece porque as operações em campo são complexas e várias questões devem ser levadas em consideração para permitir que o robô atue neste cenário, na análise de custo-benefício (Pedersen et al., 2017).

Os desafios de uma plataforma robótica podem ser divididos em duas categorias: universais –referentes às característica que robôs em outras aplicações podem se deparar, como identificação de obstáculos e planejamento de trajetória – e específicas – que estão relacionadas à natureza do cultivo, como identificação de cultivo e pestes (Fountas et al., 2020). Estes desafios ocorrem porque as plantações não são uniformes (Yaghoubi et al., 2013), e na maioria dos casos são semiestruturadas ou não estruturadas, com presença de objetos estáticos e dinâmicos (Reina et al., 2016).

Para essas plataformas, as habilidades mais importantes são navegação, detecção, ação e mapeamento (Cheein; Carelli, 2013). Por causa disso, os principais sensores utilizados para esses robôs são câmera, LiDAR (Detecção de Luz e Alcance), GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite), UMI (Unidade de Medição Inercial) e *encoders* (Fountas et al., 2020). Dentre esses sensores, GNSS podem permitir uma navegação precisa, contudo não garantem que a plataforma está navegando em cima do cultivo ou que há um objeto na trajetória do robô (Higuti et al., 2019). Para isso, são usados sensores do tipo câmera e LiDAR, porém câmeras são afetadas por problemas de variação de iluminação. Hiremath et al. (2014) afirmam que LiDAR são mais confiáveis que câmeras para o ambiente agrícola.

Este trabalho tem por o objetivo apresentar o desenvolvimento de uma plataforma robótica para monitoramento do solo em culturas de soja. A cultura de soja representa 57,19% (35,8 milhões de hectares) da área cultivada de cereais, leguminosas e oleaginosas em 2017/2018 (CONAB, 2019), e 49,25% (115,3 milhões de toneladas) da produção total de cereais, leguminosas e oleaginosas em 2018/2019 (CONAB, 2019).

2 MIRÃ 2.0 – DESCRIÇÃO GERAL

Mirã 2.0 (Figura 1a) é uma plataforma robótica com esterçamento e propulsão nas 4 rodas (4WDS) desenvolvida para monitorar características do solo em culturas de soja. Um sistema LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*) é utilizado para queimar uma amostra do solo (uma pequena porção do terreno), gerando um plasma que é lido por um sistema composto por um telescópio e um espectrômetro, para gerar um gráfico com as informações das características da amostra (Larenas, et al., 2016a, 2016b, 2016c). Esta pla-

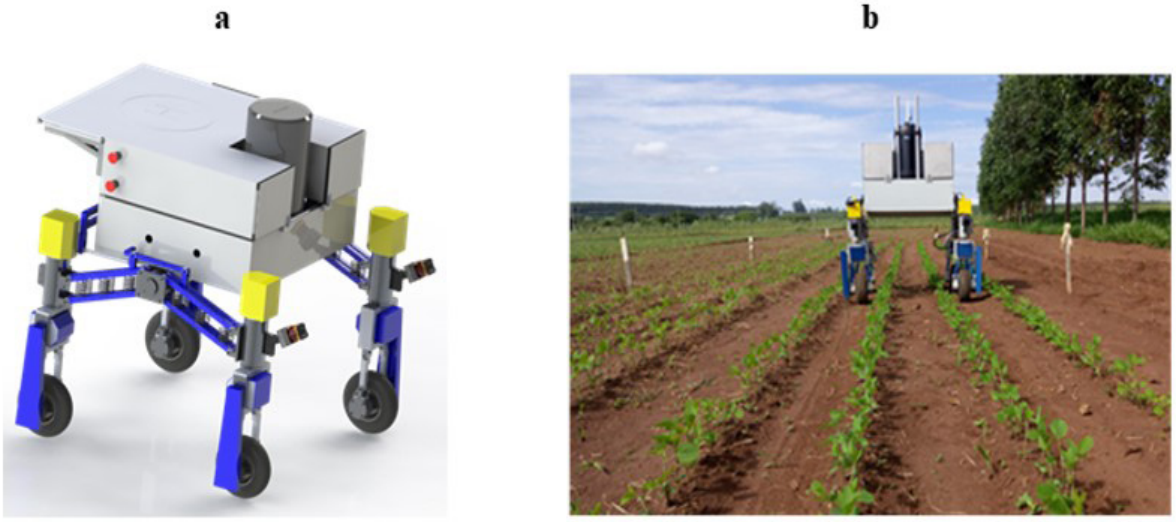


Figura 1. a) CAD do Mirã 2.0, b) Mirã 2.0.

taforma foi desenhada e construída pelo Laboratório de Robótica Móvel (LabRoM) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP), com a Embrapa instrumentação. As dimensões do Mirã 2.0 são 1.1 m x 1.1 m x 1.2 m (comprimento, largura e altura), e foi desenvolvida para navegar usando três diferentes trilhas da cultura, porque o sistema LIBS precisa de partes sem plantas do terreno para fazer as análises. A Figura 1b apresenta o robô em uma cultura de soja usando três trilhas consecutivas para sua navegação.

A estrutura do robô está composta de 4 partes: 1) corpo central, 2) sistema de suspensão, 3) módulo de esterçamento, 4) módulo de propulsão. O corpo central do robô é composto de duas caixas feitas de perfil de alumínio (0,040 m x 0,020 m) com dimensões de 0,75 m x 0,646 m x 0,27 m (largura, comprimento, altura). As partes laterais e frontais de cada caixa foram cobertas com folhas de polietileno grosso, enquanto as partes inferiores foram cobertas com folhas de alumínio grosso, de 0,007 m, para suportar e fixar os componentes embarcados nelas. A parte superior da caixa inferior não foi coberta, para dar acesso aos componentes do sistema LIBS, e sua parte traseira foi coberta com uma folha de alumínio para suportar o sistema de balanço do sistema de suspensão. A parte superior da caixa superior foi coberta com uma folha de polietileno grosso, que vai ser usada como heliporto para futuras pesquisas relacionadas ao trabalho cooperativo do Mirã com drones. Adicionalmente, na parte traseira da caixa superior foi coberta com uma folha de polietileno. A Figura 2a apresenta o corpo central do robô, e a Figura 2b mostra a distribuição dos componentes eletrônicos dentro da caixa superior.

3 SUSPENSÃO

O sistema de suspensão do Mirã 2.0 foi desenhado para se adaptar (de forma passiva) às irregularidades do terreno em culturas de soja. Para cumprir esse objetivo, o sistema de suspensão está dividido em três partes principais: 1) barra de pivô (parte 1 da Figura 3), 2) dois mecanismos de cinco barras (parte 4 da Figura 3), 3) o eixo principal do robô (parte 1 da Figura 3).

Cada mecanismo de cinco barras está composto por dois módulos de rodas e dois conjuntos de tubos quadrados (barras azuis da Figura 3). Quando uma irregularidade do terreno faz com que uma das rodas se mexa para cima ou para baixo, o mecanismo de cinco barras move-se adequadamente para gerar o movimento oposto na outra roda. Isso garante que a roda oposta não perca o contato com o solo. Adicionalmente, este movimento é transmitido de um lado para o outro mediante a barra pivô posicionada na parte traseira do robô (parte 2 da Figura 3), com o objetivo de ajustar o mecanismo de cinco barras do lado oposto para garantir o contato da maioria das rodas com o solo. Todo esse movimento tenta garantir que o corpo principal tenha a menor inclinação possível com relação ao chão (corpo principal paralelo ao chão). Adicionalmente às três partes principais da suspensão, acrescentaram-se duas barras hexagonais (parte 3 da Figura 3), que ajudam como *link* entre os mecanismos cinco barras e a barra pivô, e um conjunto de molas (posicionadas no meio dos tubos quadrados azuis) que permitem retornar o sistema de suspensão a seu estado de repouso quando o robô tenha passado sobre a irregularidade. Cada mola foi projetada para suportar 20 kg e foram usadas 12 molas em cada lado do robô. A Figura 3 apresenta as partes do sistema de suspensão do Mirã 2.0.

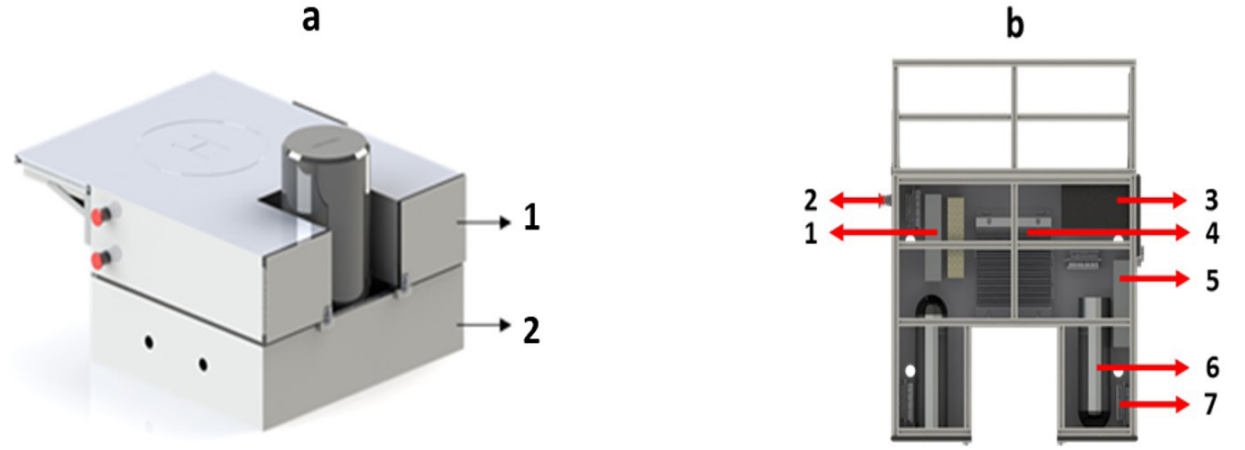


Figura 2. a) Corpo central do Mirã 2.0 composto pela caixa superior (1) e pela caixa inferior (2), b) Distribuição dos componentes eletrônicos dentro da caixa superior (1 – reguladores de tensão, 2 – botão de emergência, 3 – bateria para o computador, 4 – computador principal, 5 – regulador de tensão para o computador, 6 – bateria para os motores e as placas EPOS e ESCON, 7 – placas ESCON).

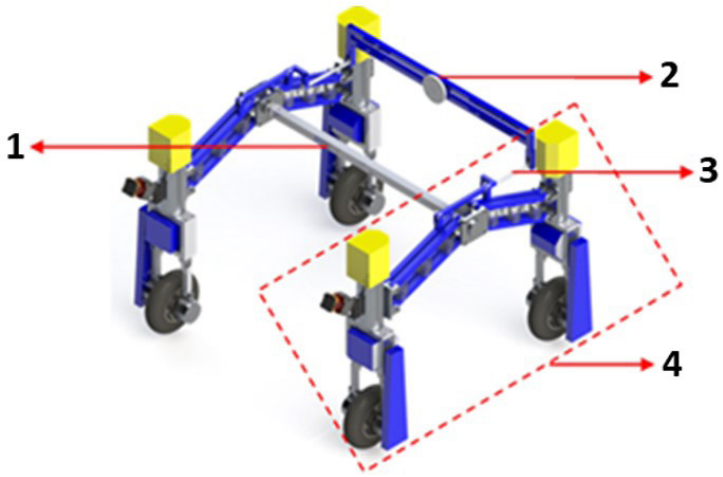


Figura 3. Sistema de suspensão do Mirã 2.0.

4 MÓDULO DA RODA

O Mirã 2.0 possui quatro módulos de roda que podem ser divididos em duas partes: direção e propulsão. A direção é composta por sete partes (Figura 4a): 1) caixa de proteção do motor de direção, 2) motor de direção, 3) eixo de direção, 4) dois rolamentos de esferas de contato angular, 5) camisa de alumínio, 6) suporte LiDAR, e 7) mecanismo de ligação do módulo de roda com o sistema de suspensão.

Para transmitir a rotação do motor de direção, um lado do eixo de direção é acoplado ao eixo do redutor do motor de direção, e o outro é acoplado à parte de propulsão do módulo de roda (Figura 4b). O eixo da direção passa por dois rolamentos de esferas de contato angular (referência 7206), que são fixados na camisa de alumínio para permitir que a rotação do motor da direção seja transmitida para a parte de propulsão, do módulo da roda, sem mover a camisa de alumínio (parte fixa do módulo da roda). Além disso, o suporte LiDAR e o mecanismo para conectar o módulo da roda às barras paralelas duplas do sistema de suspensão estão na parte dianteira e traseira da camisa de alumínio. Por fim, na parte superior da direção, encontra-se uma caixa amarela de proteção para o motor de direção.

A parte de propulsão do módulo roda (Figura 4b) é composta por oito partes: 1) quadro de alumínio, 2) motor propulsor, 3) caixa de proteção para motor propulsor, 4) sistema de polias, 5) eixo roda, 6) duas flanges de roda, 7) pneu com câmara de ar, e 8-) caixa de proteção do sistema de polias. A barra superior do quadro de alumínio é utilizada para acoplar a parte de propulsão e o eixo de direção, e sua barra inferior é acoplada ao volante. Dentro do quadro de alumínio estão localizados o motor de propulsão e a caixa de proteção.

A base da roda é composta por uma barra de alumínio conectada em suas extremidades à flange da roda. Além disso, existem dois rolamentos de esferas (referência 6005-zz) dentro da flange da roda, para permitir o movimento desta. Finalmente, a rotação do motor de propulsão é transmitida ao eixo da roda por duas polias e uma correia sincronizadora (sistema de polias). A primeira polia tem 10 dentes e é acoplada ao redutor do motor de propulsão, enquanto a segunda polia tem 30 dentes e é acoplada ao eixo da roda. Como as duas polias têm número de dentes diferentes e a polia

Figura 4. a) Componentes de direção do módulo das rodas, b) Componentes da propulsão do módulo das rodas.

da roda tem o maior número de dentes, então há uma relação de transmissão de 1:3. Esta relação faz com que o torque no eixo da roda seja o triplo do torque do motor de propulsão, mas a velocidade do motor de propulsão no eixo do redutor é reduzida pela terceira parte.

5 DISPOSITIVOS EMBARCADOS E ATUADORES

O Mirã 2.0 possui oito motores EC (Eletronicamente Comutados) 90 FLAT (referência: 429271) fabricados pela Maxon Motor. Quatro desses são utilizados para o conjunto de propulsão, e os demais são para o conjunto de direção. A tensão nominal é de 36 V, a corrente nominal (corrente contínua máxima) é de 4,76 A, a velocidade nominal é de 2.510 rpm (rotação por minuto) e o torque nominal é de 560 mNm (Maxon Motor, 2017a). Esses motores possuem dois eixos de saída (dianteiro e traseiro). O eixo dianteiro é acoplado a um encoder incremental MILE (referência: 453234), e o outro é acoplado a um redutor planetário GP 52C (referência: 223086), que possui redução igual a 21:1 e rendimento máximo igual a 83% (Maxon Motor, 2018b). O encoder incremental possui dois canais e 512 pulsos por volta (Maxon Motor, 2017b).

Para controlar os motores do sistema de propulsão são utilizadas quatro placas ESCON 50/5. De acordo com Maxon Motor (2018a), ESCON é poderoso servocontrolador PWM (Pulse Width Module) de quatro quadrantes de tamanho pequeno para o controle eficiente de motores CC (Corrente Contínua) ativados por ímã permanente. Esta placa pode operar motores DC e EC e possui três modos de operação: controlador de corrente, controlador de velocidade (malha fechada) e controlador de velocidade (malha aberta).

Para controlar os motores do sistema de direção são utilizadas quatro placas EPOS2 24/5. A placa EPOS2 24/5 é um controlador de posicionamento digital de construção modular, é adequado para motores EC e DC e possui 10 modos de operação, entre os quais está o modo de posição (Maxon Motor, 2017c). A comunicação entre os dispositivos de propulsão e o sistema de direção é mostrada na Figura 5.

A comunicação entre o computador e as placas EPOS2 é feita via USB (*Universal Serial Bus*). O computador en-

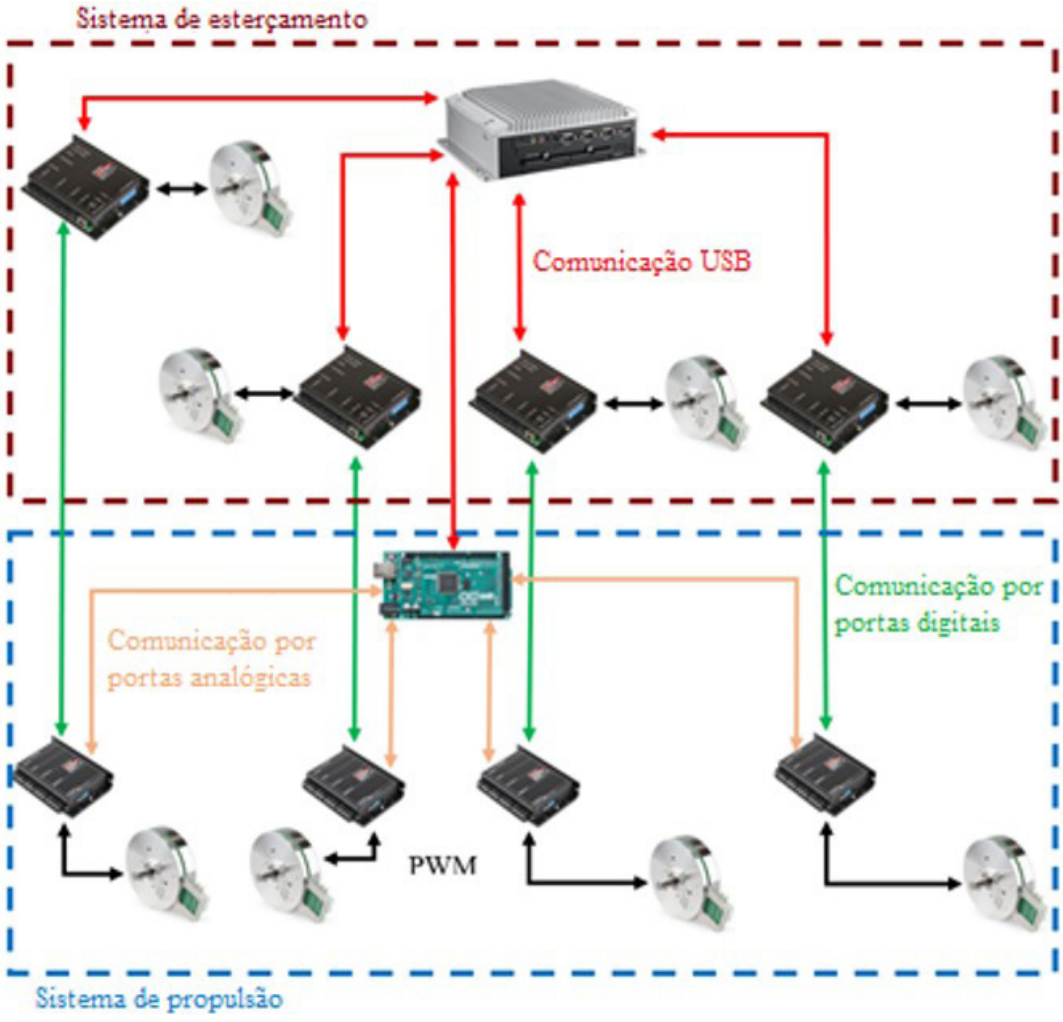


Figura 5. Comunicação entre sistema de direção e sistemas de propulsão.

via à EPOS2 a posição desejada do motor de direção e os valores para os sinais de habilitar e direção. Para transmitir esses sinais para a placa ESCON, duas portas digitais da ESCON são conectadas a duas portas lógicas do EPOS2. Estas portas são utilizadas para indicar quando o motor de propulsão deve partir e a direção de sua rotação. Se o sinal de habilitar for 1 (nível lógico alto), o motor inicia sua rotação, caso contrário (habilitar igual a 0) o motor para. Quando a direção é 1 (nível lógico alto), o motor gira no sentido horário, caso contrário (direção igual a 0) o motor gira no sentido anti-horário. Além dos sinais de habilitar e direção, um sinal PWM é utilizado para indicar a velocidade do motor de propulsão. Este sinal é gerado pela placa Arduino e transmitido à ESCON por uma porta analógica. Além disso, a placa ESCON e EPOS2 inicia o movimento dos motores de propulsão e direção utilizando um sinal PWM para cada motor. Por fim, o computador envia para a placa Arduino Mega 2560 o valor do sinal PWM a ser enviado à ESCON, e este recebe do Arduino o valor de velocidade ou corrente do motor de propulsão. Além dos motores, das placas ESCON e EPOS2, e do Arduino, o Mirã 2.0 possui outros dispositivos embarcados para sua navegação. O computador do Mirã 2.0 é um ARK-3510 fabricado pela Advantech: um computador industrial com processador Intel i7, 6GB de RAM, 500GB de disco rígido e seis portas USB. O sistema operacional é o Linux Ubuntu 14.04. Além disso, a plataforma robótica possui uma Unidade de Medição Inercial MPU9150 para medir os ângulos de Euler (arfagem, rolamento e guinada), dois sensores 2D LiDAR cujo modelo comercial é o UTM-30LX (fabricado pela empresa Hokuyo) e um receptor GPS cujo modelo comercial é PIKSI, fabricado pela Swift Navigation. Todos os dispositivos embarcados (exceto as placas e os motores ESCON) são conectados ao computador ARK-3510, conforme mostrado na Figura 6.

Como as quatro placas EPOS2, Arduino, UMI, GPS e os dois sensores LiDAR estão conectados ao ARK-3510 por portas USB, foi necessário o uso de um *hub* USB, pois o computador possui apenas seis portas USB. Por fim, um roteador sem fio foi embutido para acessar o computador remotamente. Seu modelo comercial é o AC1350, fabricado pela TP-LINK.

6 POSIÇÃO DO CENTRO DE MASSA DO ROBÔ

A posição do centro de massa do robô foi determinada pelo método apresentado em Velasquez (2015) e Jazar (2018). De acordo com este método, a posi-

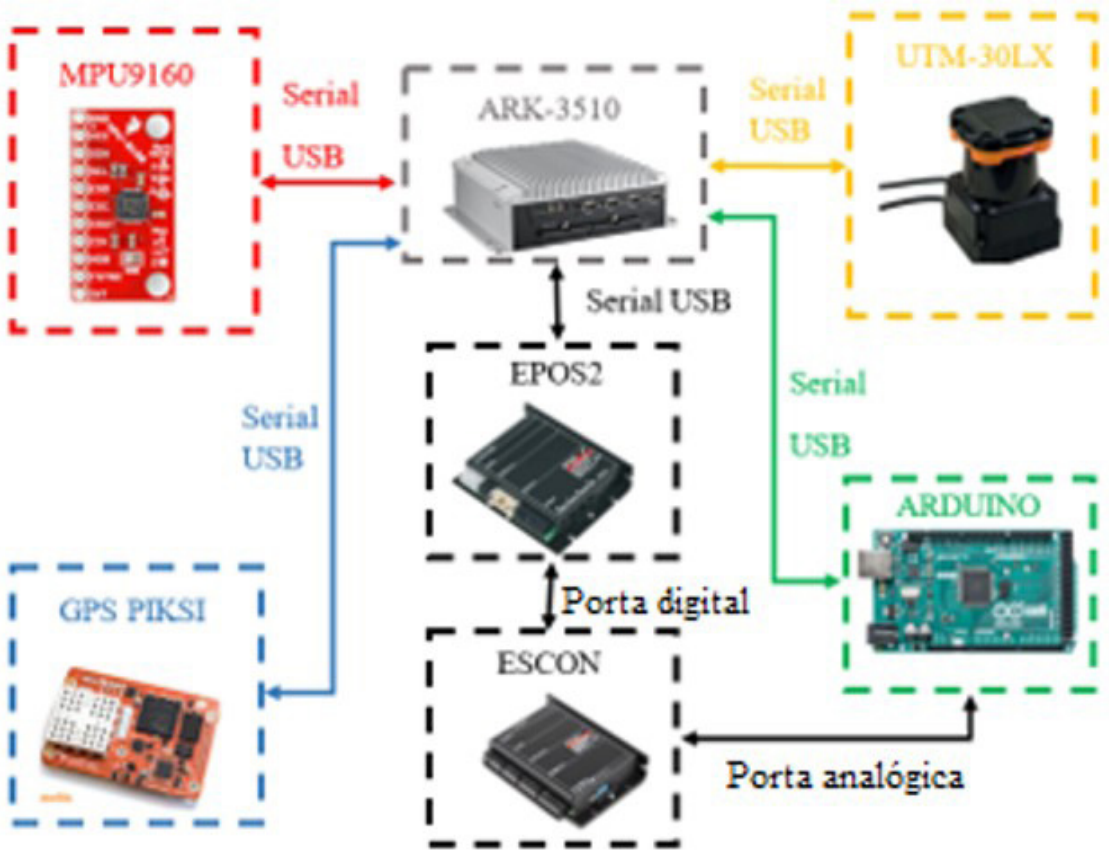


Figura 6. Comunicação entre dispositivos embarcados da plataforma robótica.

ção longitudinal do centro de massa pode ser calculada medindo a força sob as rodas dianteiras ou traseiras do robô quando o robô está estacionado em um terreno plano. Além disso, a posição lateral do centro de massa pode ser determinada medindo a força sob as rodas do lado direito ou esquerdo do robô quando o robô está estacionado em um terreno plano. Finalmente, a altura do centro de massa é calculada medindo a força sob as rodas dianteiras quando o robô está estacionado em um terreno inclinado. As posições do centro de massa do Mirã 2.0 estão resumidas nas Tabelas 1, 2 e 3.

Nestas tabelas, a1 é a distância entre o centro de massa e o eixo dianteiro do robô; a2 é a distância entre o centro de massa e o eixo traseiro do robô; b1 é a distância lateral entre o centro de massa e as rodas do lado esquerdo; b2 é a distância entre o centro de massa e as rodas do lado direito; h é a altura do centro de massa.

Conforme as Tabelas 1, 2 e 3, observa-se que a parte traseira da plataforma é mais pesada que a parte dianteira em razão de a posição longitudinal do centro de massa estar mais próxima do eixo traseiro do que do eixo dianteiro. Embora todos os cuidados possíveis tenham sido tomados para fazer uma medição precisa, a Tabela 1 revela que a posição lateral do centro de massa foi diferente quando calculada com relação ao lado direito e quando calculada com relação ao lado esquerdo. Isso indica que o centro de massa nesse tipo de plataforma não tem uma posição fixa.

Tabela 1. Posição lateral do centro de massa do Mirã 2.0.

Ponto de Medição	Posição Lateral (m)
Forças medidas sob as rodas do lado direito	b1 = 0,452 ± 0,0014
	b2 = 0,447 ± 0,0017
Forças medidas sob as rodas do lado esquerdo	b1 = 0,437 ± 0,0029
	b2 = 0,462 ± 0,0027

Tabela 2. Posição longitudinal do centro de massa do Mirã 2.0.

Ponto de Medição	Posição longitudinal (m)
Forças medidas sob as rodas dianteiras	a1 = 0,5 ± 0,0015
	a2 = 0,4 ± 0,0017
Forças medidas sob as rodas traseiras	a1 = 0,5 ± 0,0015
	a2 = 0,4 ± 0,0011

Tabela 3. Altura do centro de massa do Mirã 2.0.

Ponto de Medição	Altura (m)
Forças medidas sob as rodas dianteiras	h = 69,83 ±0.0014

7 TORQUE DA RODA E MÁXIMA INCLINAÇÃO

Como o sistema de propulsão de cada roda é composto por roda, conjunto de duas polias movidas por uma correia sincronizadora e motor com redutor, então o torque gerado pela roda depende do sistema de transmissão.

Para calcular o torque da roda e sua velocidade máxima, é necessário conhecer o torque no eixo do redutor (Equação 1). Como o torque no eixo do motor é igual a 560 mN.m e este está conectado ao redutor que tem redução igual a 21:1 e sua eficiência máxima é de 83%, então o torque no eixo do redutor pode ser calculado conforme a Equação 1.

$$\tau_{eixo} = \tau_{motor}\, x\, 21 x\, 0.83 = 9,76\, N.m \quad (1)$$

Como a rotação do motor de propulsão é transmitida ao eixo da roda por duas polias e uma correia sincronizadora, e sua relação de transmissão é 1:3, então o torque no eixo da roda é três vezes o torque do motor de propulsão (29,28 N.m). Para calcular a força gerada pelo motor de propulsão na roda, utiliza-se a Equação 2.

$$F_{roda}\,(N) = \frac{3\, x\, \tau_{eixo}}{r_{roda}} = \frac{3\, x\, 9.76\, Nm}{0.125\, m} = 234,24\, N \quad (2)$$

Nessa, r_{roda} é o raio da roda (0,125 m). De acordo com a Equação 2, a maior força gerada por roda é 234,24 N. Como a plataforma robótica tem quatro rodas, sua maior força de propulsão é 936,96 N. Como o peso do robô é 125,8 kg (valor crítico para o peso do robô) e a força de propulsão é igual a 936,96 N (maior força de propulsão), então a plataforma robótica pode navegar em um terreno com inclinação inferior a 49,46° (ver Equação 3).

$$\theta_{inclinação}\,(°) = \left(\frac{4\, x\, F_{roda}}{m\, x\, g}\right) = \left(\frac{936.96\, N}{125.8\, kg\, x\, 9.8\, \frac{m}{s^2}}\right) = 49,46° \quad (3)$$

Na Equação 3, m é a massa do robô e g é a gravidade. Segundo Höfig e Araujo-Junior (2015), "[...] as classes de declividade do solo foram classificadas de acordo com o potencial de mecanização em extremamente apto (0 a 5%), muito apto (5,1 a 10%), apto (10,1 a 15%), moderadamente capaz (15,1 -20%) e não recomendado (> 20%)". Assim, a plataforma ro-

bótica proposta pode navegar em lavouras com declives recomendados e pode navegar em algumas lavouras com declives não recomendados (>20%) (Higuti et al., 2017).

8 SISTEMA ELÉTRICO DO ROBÔ

O sistema elétrico da plataforma robótica é composto por duas baterias de lítio de 36 V e 10 Ah, uma bateria de lítio de 36 V e 6,75 Ah, dois reguladores de tensão cuja referência comercial é RSD-300C-24 e um regulador de tensão cuja referência comercial é RSD-150C-12.

A primeira bateria de 36 V e 10 Ah é utilizada para fornecer a tensão e corrente das placas EPOS2 e motores de direção. Esta bateria é conectada a um botão de emergência e a um fusível para fornecer um sistema de segurança para parada de emergência do robô. Além disso, o botão está conectado aos reguladores de tensão (RDS-300C-24). Estes reguladores são utilizados para reduzir a tensão da bateria de 36 V para 24 V, pois a tensão máxima de alimentação da placa EPOS2 é 24 V. Duas placas EPOS2 e dois motores são conectados em cada regulador de tensão (RDS-300C-24).

A outra bateria de 36 V e 10 Ah é utilizada para fornecer a tensão e corrente das placas ESCON e motores de propulsão. Esta bateria é conectada a um segundo botão de emergência para fornecer um sistema de segurança para parada de emergência do robô. Como os sistemas de potência ESCON suportam uma tensão de alimentação superior a 36 V, não é necessário o uso de regulador de tensão, e os ESCON são conectados ao segundo botão de emergência. Por fim, a bateria de 36 V e 6,75 Ah é utilizada para fornecer a tensão e corrente para os demais dispositivos (Arduino, computador e LiDAR). Para isso, esta bateria é conectada ao regulador de tensão RSD-150C-12 para reduzir a tensão de 36 V para 12 V.

Para determinar a autonomia elétrica do robô, o consumo de energia de todos os sensores e dispositivos embarcados foi calculado utilizando a Equação 4 e as informações apresentadas na Tabela 4.

$$P(W) = V \, x \, I \tag{4}$$

Conforme a Tabela 4, o consumo de energia de um motor de propulsão com placa ESCON respectivamente é de 171,55 W. Como cada bateria de 36 V e 10 Ah fornece 360 Wh e está conectada a dois conjuntos de motor de propulsão com placa ESCON, então a autonomia desta bateria é de aproximadamente 63 minutos. Já o conjunto do motor de direção e sua placa EPOS2 tem um consumo de energia igual a 114,65 W, e como a segunda bateria também fornece 360 Wh, então a autonomia elétrica é de aproximadamente 82 minutos. O consumo de energia da bateria usada para alimentar os demais dispositivos (GPS, UMI, LiDAR e PC) é de 111 Wh e autonomia elétrica de aproximadamente 92 minutos. Para determinar a autonomia elétrica do robô, é utilizado o menor valor da autonomia elétrica das baterias embutidas. Para este caso, a autonomia elétrica do robô é de aproximadamente 63 minutos.

9 MODO DE NAVEGAÇÃO DO ROBÔ

O Mirã 2.0 possui cinco modos de navegação: 1) movimento lateral; 2) movimento diagonal; 3) rotação em seu eixo z; 4) Ackerman positivo e 5) Ackerman negativo.

O segundo modo de navegação do robô é a rotação em seu eixo z (Figura 7b). Para isso, a roda dianteira do lado esquerdo e a roda traseira do lado direito são esterçadas a -45° (direcionamento para o lado direito do robô). Além disso, a roda dianteira do lado direito e a roda traseira do lado esquerdo estão esterçadas a 45° (direcionando para o lado esquerdo do robô). Para gerar uma rotação do robô em direção ao seu lado direito, as rodas do lado esquerdo do robô movem-se para a frente e as outras rodas movem-

Tabela 4. Potência consumida por cada componente do robô.

Componente	Tensão (V)	Corrente Nominal (A)	Pontência Consumida (W)
UTM-30LX	12	1,00	12.00
ARK 3510	12	5,00	60,00
PISKI GPS	5	0,50	2,50
MPU-9150	5	0,10	0,50
Motores de propulsão + ESCON 50/5	36	4,86	171,55
Motores de esterçamento + EPOS2 24/5	24	4,88	114,65

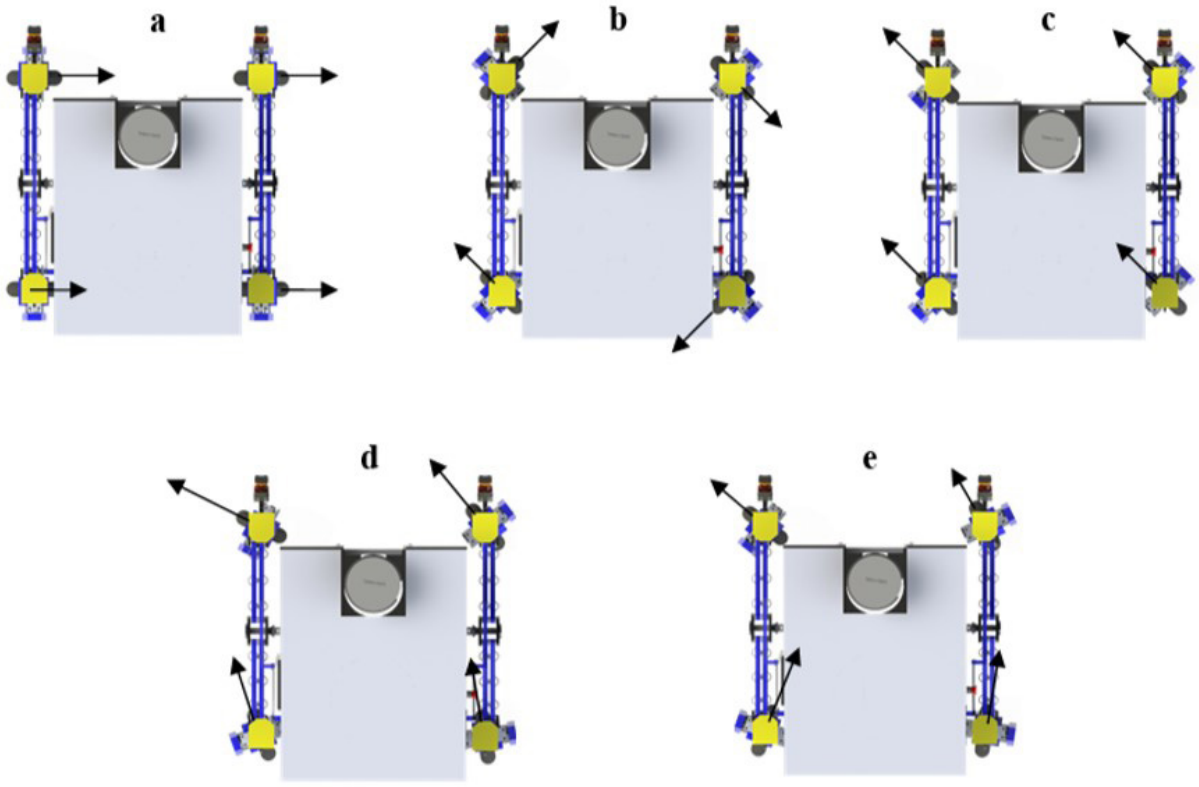


Figura 7. Modos de navegação do Mirã 2.0. a) Movimento lateral, b) Rotação sobre seu eixo z, c) Movimento diagonal, e) Ackerman positivo e f) Ackerman negativo.

-se para trás. Para gerar a rotação oposta, a rotação de cada roda é invertida. O deslocamento diagonal é o terceiro modo de navegação (Figura 7c). Neste modo, todas as rodas esterçam a 45° para gerar um deslocamento diagonal do robô em direção ao seu lado esquerdo ou a -45° para gerar o deslocamento diagonal oposto. O sentido de rotação das quatro rodas é o mesmo e depende do movimento do robô. Os dois últimos modos de navegação do robô são o movimento Ackerman negativo (Figura 7e) e positivo (Figura 7d).

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A plataforma Mirã 2.0 foi projetada e construída para navegar em terreno agrícola, mais especificamente cultura de soja, com o objetivo de monitorar, utilizando LIBS, o solo, facilitando esta tarefa da AP.

Esta plataforma foi desenvolvida baseando-se nas características do cultivo de soja. Além disso, como o Mirã 2.0 possui GNSS, torna-se possível fazer a geolocalização de objeto, que é uma informação importante para a área de AP.

Os cinco modos de navegação foram utilizados para validar a movimentação da plataforma no cultivo de soja. Tais modos mostraram um bom desempenho na relação entre a navegação manual e o cultivo. Desta forma, pode-se viabilizar a implementação da navegação autônoma da plataforma Mirã 2.0

O uso desse tipo de plataforma robótica vai permitir reduzir o tempo e esforço necessário para o monitoramento de culturas de soja. Por exemplo, o tempo atual para obter os resultados da análise do solo demora alguns dias, mas utilizando o Mirã 2.0 e o sistema LIBS, o tempo será de alguns segundos.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa, à Escola de Engenharia de São Carlos, às agências de fomento Capes, CNPq e Fapesp, e ao Lanaf (CNPq 440226/2021-0 e Embrapa 20.24.00.059.00.00).

REFERÊNCIAS

BECHAR, A.; VIGNEAULT, C. Agricultural robots for field operations: concepts and components. **Biosystems Engineering**, v. *149*, p. 94-111, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014.

CHEEIN, F. A. A.; CARELLI, R. Agricultural Robotics: Unmanned Robotic Service Units in Agricultural Tasks. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, [S.I], v. 7, n. 3, p. 48-58, 2013.

CISTERNAS, I.; VELÁSQUEZ, I.; CARO, A.; RODRÍGUEZ, A. Systematic literature review of implementations of precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *176*, p. 105626, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105626.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira**: grãos. Brasília, DF, 2019. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos. Accesso em: 28 nov. 2022

FOUNTAS, S.; MYLONAS, N.; MALOUNAS, I.; RODIAS, E.; HELLMANN SANTOS, C.; PEKKERIET, E. Agricultural robotics for field operations. **Sensors (Basel)**, v. *20*, n. 9, p. 2672, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/s20092672.

HIGUTI, V. A. H.; VELASQUEZ, A. E. B.; GASPARINO, M. V.; DE OLIVEIRA G. C.; CARRASCO, C. I.; RISARDI, J. C.; MAGALHÃES, D. V.; BECKER, M. Robotic platform with passive suspension to be applied on soybean crops: initial results. In: ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 24, 2017, Curitiba. **Proceedings**...Curitiba: ABCM, 2017. p. 1-10.

HIGUTI, V. A.; VELASQUEZ, A. E.; MAGALHAES, D. V.; BECKER, M.; CHOWDHARY, G. Under canopy light detection and ranging-based autonomous navigation. **Journal of Field Robotics**, v. *36*, n. 3, p. 547-567, 2019. DOI: http://doi.org/10.1002/rob.21852.

HIREMATH, S.A.; VAN DER HEIJDEN, G.W.A.M.; VAN EVERT, F.K.; STEIN, A.; TER BRAAK, C.J.F. Laser range finder model for autonomous navigation of a robot in a maize field using a particle filter. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *100*, p. 41-50, 2014. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.005.

HÖFIG, P., ARAUJO-JUNIOR, C.F. Classes de declividade do terreno e potencial para mecanização no estado de Paraná (Types of ground declivity and potential for mechanization in the Paraná state). **Coffee Science**, [S.I], Vol. 10, n. 2, p. 195-203, 2015.

JAZAR, R. N. **Vehicle dynamics:** *theory and application*. New York: Springer, 2008. DOI: http://doi.org/10.1007/978-0-387-74244-1.

LARENAS, M. C.; MAGALHÃES, D. V.; BECKER, M. Design of robotics arm for LIBS in field. In: SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DA EESC-USP – SiPGEM. **Proceedings** [...]. São Carlos: EESC, 2016b. p. 1-9.

LARENAS, M. C.; MAGALHÃES, D. V.; MILORI, D. M. B. P. Sistema de enfoque automático para espectroscopia de plasma induzido por laserT. In: *REUNION IBERO-AMERICANA DE ÓPTICA Y REUNIÓN IBERO-AMERICANA DE ÓPTICA, LASERS Y APLICACIONES*. **Proceedings** [...]. Pucón: RIAO, 2016a.

LARENAS, M. C.; MILORI, D. M. B. P.; MAGALHÃES, D. V. Efeito da compactação do solo sobre o nível da sinal obtida por espectrometria de emissão óptica com plasma inducido por laser (LIBS). In: SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DA EESC-USP – SiPGEM. **Proceedings** [...]. São Carlos: EESC, 2016c. p. 1-16.

MAXON MOTOR. **EC 90 Flat**. 2017a. Disponível em: https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/8825435389982.pdf. Acesso em: 28 nove. 2022.

MAXON MOTOR. **Encoder MILE**. 2017b. Disponível em: https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/8825854066718.pdf. Acesso em: 28 nov. 2022.

MAXON MOTOR. **EPOS2 Aplication Notes Collection**. 2017c. Disponível em: https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/root/8834322759710/EPOS2-Application-Notes-Collection-En.pdf. Acesso em: 28 nov. 2022.

MAXON MOTOR. **ESCON**. 2018a. Disponível em: https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/root/8884130873374/EN-21-498-499-503.pdf. Acesso em: 28 nov. 2022.

MAXON MOTOR. **Planetary Gearhead GP 52C**. 2018b. Disponível em: https://www.maxongroup.com/medias/sys_master/8831071289374.pdf. Acesso em: 28 nov. 2022.

PEDERSEN, S. M.; FOUNTAS, S.; SORENSEN, C. G., VAN EVERT, F. K.; BLACKMORE, B. S. Robotic seeding: economic perspectives. In: PEDERSEN, S. M.; LIND, K .M. (Eds.). **Precision Agriculture:** *technology and economic perspectives.* Cham: Springer, 2017. p. 167-179. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-319-68715-5_8.

REINA, G.; MILELLA, A.; ROUVEURE, R.; NIELSEN, M.; WORST, R.; BLAS, M. R. Ambient awareness for agricultural robotic vehicles. **Biosystems Engineering**, v. *146*, p. 114-132, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.12.010.

SPARROW, R.; HOWARD, M. Robots in agriculture: prospects, impacts, ethics, and policy. **Precision Agriculture**, v. *22*, n. 3, p. 818-833, 2021. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-020-09757-9.

VALIN, H.; SANDS, R. D.; VAN DER MENSBRUGGHE, D.; NELSON, G. C.; AHAMMAD, H.; BLANC, E.; BODIRSKY, B.; FUJIMORI, S.; HASEGAWA, T.; HAVLIK, P.; HEYHOE, E.; KYLE, P.; MASON-D'CROZ, D.; PALTSEV, S.; ROLINSKI, S.; TABEAU, A.; VAN MEIJL, H.; VON LAMPE, M.; WILLENBOCKEL, D. The future of food demand: understanding differences in global economic models. **Agricultural Economics**, v. *45*, n. 1, p. 51-67, 2014. DOI: http://doi.org/10.1111/agec.12089.

VELASQUEZ, A. E. B. **Helvis III: desenvolvimento e caracterização da plataforma robótica [[Q6: Q6]].** 2015. 167 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

YAGHOUBI, S.; AKBARZADEH, N. A.; BAZARGANI, S. S.; BAZARGANI, S. S.; BAMIZAN, M.; ASL, M. I. Autonomous robots for agricultural tasks and farm assignment and future trends in agro robots. **International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering**, v. *13*, n. 3, p. 1-6, 2013.

Desenvolvimento de sistema embarcado de coleta de dados para geração de mapas de produtividade

8

Development of an embedded system of data collection for generation of productivity maps

Paula Leticia Souza de Moura[1], Leticia dos Santos[2], Glaucio José Gomes[3], Luciano Gebler[4], Ricardo Sobjak[5], Paulo Cesar Tonin[6], Kelyn Schenatto[7], Claudio Leones Bazzi[8]

[1] *Estudante, Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, paulamoura@alunos.utfpr.edu.br*

[2] *Estudante, Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, leticinha.santos@hotmail.com*

[3] *Pós-Doutorando, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, glauciogames@hotmail.com*

[4] *Pesquisador, Embrapa Uva & Vinho, Estação Experimental de Fruticultura de Clima Temperado (EFCT), Vacaria (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br*

[5] *Professor, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, ricardosobjak@utfpr.edu.br*

[6] *Professor, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, pctonin@utfpr.edu.br*

[7] *Professor, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, kschenatto@utfpr.edu.br*

[8] *Professor, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, bazzi@utfpr.edu.br*

RESUMO

Dada a expansão na utilização de áreas para agricultura, surge a necessidade de implantar estratégias eficientes em relação ao manejo do solo e da produtividade, devido às extensas áreas cultivadas. Nesse sentido, a agricultura de precisão oferece importantes ferramentas para detalhar e tratar áreas cultivadas com suas intrínsecas diferenças, isto é, gerenciar os insumos agrícolas pontualmente, de forma a atender as necessidades de diferentes culturas. Assim, a geoestatística possui um papel extremamente importante, permitindo o estudo da variabilidade espacial de uma determinada área por meio da coleta de dados e utilização de modelos matemáticos apropriados, podendo incluir o sistema de informações geográficas. A coleta desses dados, entretanto, no contexto de áreas de cultivo extensas, é um desafio que pode ser superado com auxílio de dispositivos eletrônicos de georreferenciamento, sistemas de armazenamento e leitura de informações, com objetivo de mapear a produtividade. Portanto, o presente trabalho se dedica ao desenvolvimento de um sistema/dispositivo embarcado na sacola de colheita do trabalhador que possibilita a coleta e armazenagem de dados de interesse, para análise geoestatística. O dispositivo eletrônico desenvolvido possui um receptor de sinal de sistema de posicionamento global, que coleta as coordenadas geográficas, um leitor de radiofrequência e um sistema de armazenamento dos dados em um cartão de memória micro SD, módulos interligados por meio de uma placa de circuito impresso e controlados por um módulo ESP32, no qual o software que implementa a leitura e o controle dos sinais foi realizado pelo IDE do Arduíno. O ESP32 possui tecnologia BLE ou *Bluetooth Smart,* favorecendo a redução de custos de transferência de dados, além do armazenamento em cartão micro SD. O equipamento foi previamente avaliado em testes de bancada e em experimentos de campo realizados sobre duas áreas de cultivo de maçãs. Os resultados da primeira fase experimental mostraram que o protótipo apresenta alta eficiência na coleta de dados de mobilidade, informando o posicionamento dos coletores e a identificação das caixas onde os frutos foram descarregados. Os dados coletados pelo protótipo, quando transferidos para o software FruitMap, permitiram construir mapas de produtividade. Contudo novos testes devem ser realizados no futuro em outras culturas, bem como o dispositivo

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000080

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

deve se tornar mais robusto, permitindo uma maior durabilidade frente a impactos sofridos no campo. Esse trabalho enfatiza a tendência de novas tecnologias de baixo custo para o cultivo de culturas colhidas manualmente, as quais vão permitir nos próximos anos uma maior geração de dados durante a colheita, impactando positivamente uma melhor tomada de decisão, para maximizar a produtividade de diferentes culturas energéticas e alimentares.

Palavras-chave: agricultura de precisão; sistema embarcado; geoestatística; produtividade.

ABSTRACT

Given the expansion in the use of areas for agriculture, there is a need to implement efficient strategies in relation to soil management and productivity, due to the extensive cultivated areas. Therefore, precision agriculture offers important tools for detailing and treating cultivated areas with their intrinsic differences, that is, managing agricultural inputs punctually, to meet the needs of different cultures. Geostatistics has an extremely important role, allowing the study of the spatial variability of a given area through data collection and use of appropriate mathematical models, which may include the geographic information system. The collection of these data, however, in the context of extensive areas of cultivation, are challenges that can be overcome with the aid of electronic devices for georeferencing, systems for storing and reading information, to map productivity. The present work aims to develop a device system embedded in the worker's collection bag that enables the collection and storage of data of interest for geostatistical analysis. The electronic device developed has a global positioning system signal receiver, which collects geographic coordinates, a radiofrequency reader, and a data storage system on a micro SD card. These modules were interconnected through a printed circuit board and were controlled through an ESP32 module, in which the software that implements the reading and control of the signals was performed by the Arduino IDE. The ESP32 has BLE or Bluetooth Smart technology, favoring the reduction of data transfer costs in addition to storage on a micro SD card. The equipment was previously evaluated in bench tests and in field experiments carried out in two apple growing areas. The results of the first experimental phase showed that the prototype presents high efficiency in collecting mobility data, informing the positioning of the collectors and the identification of the boxes where the fruits were unloaded. The data collected by the prototype when transferred to the FruitMap Software allowed the construction of productivity maps. However, new tests must be carried out in the future in other cultures, as well as the device must become more robust, allowing greater durability on the impacts suffered in the field. This work emphasizes the trend of new low-cost technologies for the cultivation of manually collided crops, which will allow in the coming years a greater generation of data during the harvest that will positively impact on a better decision making to maximize the productivity of different energy crops and food.

Keywords: precision agriculture; embedded system; geostatistics; sustainability

1 INTRODUÇÃO

Devido ao aumento da população, a demanda por produtos vegetais aumentou e como em muitos países praticamente não há possibilidade de crescimento da área cultivada, a necessidade de aumentar a produção está diretamente relacionada ao uso intensivo de tecnologias e diferentes formas de manejo, mais adequados e que possibilitem a redução dos impactos ambientais causados ao meio ambiente (Fukase; Martin, 2020; Saath; Fachinello, 2018; van Dijk et al., 2021). Nesse sentido, o crescente desenvolvimento de sistemas agrícolas comerciais desempenha um papel importante no crescimento econômico brasileiro, resultando em um complexo desafio de escalar as culturas energéticas e alimentares de forma sustentável, garantindo um crescimento a longo prazo (Azevedo Junior; Rodrigues; Silva, 2022; Martinelli et al., 2010; Pellegrina, 2022). Assim, se faz necessário, resgatar a percepção da capacidade de identificar diferenças no solo e no relevo das áreas cultivadas em pequenas propriedades rurais nas quais as atividades agrícolas de ciclo curto ou semiperenes são realizadas de forma manual, necessitando de tratamentos distintos. As transformações no cenário agrário, especialmente na expansão evidente de áreas destinadas à lavoura, lançam o desafio de adequar o manejo da não uniformidade a essas pequenas áreas de cultivo, visando a otimização da produtividade nas atividades de campo.

Para otimizar a sustentabilidade no campo, mitigando os impactos ambientais e maximizando a lucratividade, a agricultura de precisão (AP) oferece inúmeras decisões (corretas) por unidade de área de terra e por unidade de tempo, com benefício líquido associado (Cobbenhagen et al., 2021). Dessa maneira, entre os diversos aportes tecnológicos, a geoestatística inserida na AP trata do estudo da variabilidade espacial de uma determinada área por meio da coleta de dados e utilização de modelos matemáticos apropriados (Mulla, 2012). Assim, as coletas de dados de produtividade em áreas de cultivo extensas podem ser exploradas combinado dispositivos eletrônicos de georreferenciamento e sistemas de armazenamento e leitura de informações com o objetivo de mapear a produtividade (Bazzi et al., 2022; Betzek et al., 2019;

Dall'Agnol et al., 2020). Considerando que a eletrônica embarcada é amplamente aplicada a máquinas agrícolas (Abbasi et al., 2022; Boursianis et al., 2022), a quantidade de empresas brasileiras que de fato incorporam essa ferramenta de tecnologia da informação não é expressiva no mercado destinado a pequenos processos manuais de atividade agrícola. Nesse cenário nosso aporte à literatura apresenta o desenvolvimento de um sistema embarcado que permite realizar a coleta de dados de operações de colheitas manuais, a fim de gerar mapas de produtividade para o cultivo de diferentes culturas alimentares e energéticas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O dispositivo eletrônico desenvolvido conforme o esquema apresentado na Figura 1 possui um receptor de sinal Global Position System (GPS) que coleta as coordenadas geográficas, um leitor Radio-Frequency Identification (RFID) e um sistema de armazenamento dos dados em cartão de memória micro SD.

Esses módulos foram interligados por meio de uma placa de circuito impresso (PCI), sendo controlados por um módulo ESP32 administrado por software que implementa a leitura e controle dos sinais por meio da IDE do Arduíno. O ESP32 possui tecnologia *Bluetooth* já incorporada ao módulo, o que permite outra forma de transmissão de dados além do armazenamento em cartão micro SD.

Como o sistema inicialmente foi avaliado para testes em campo, a alimentação do hardware foi feita com duas baterias recarregáveis Íon de lítio Li-Ion, modelo 18650 de 4,2 V, com capacidade de carga de 9800 mAh cada, ligadas em paralelo para aumentar a autonomia do equipamento (Figura 1). Entretanto, a soma das capacidades individuais das baterias, que é conveniente para aumentar o tempo de funcionamento do dispositivo em campo, acarreta na necessidade reduzir a tensão de saída da ligação paralela para alimentar a PCI, que tem todos os módulos dependentes de alimentação em 3,3 V. Foi escolhido adicionar um diodo 1N4007, que, além de proporcionar a queda de 0,7 V de tensão, também auxilia na proteção do circuito da PCI, evitando correntes reversas em possível troca de polaridade na fonte de alimentação. Assim, a tensão de saída do circuito de alimentação foi alterada de 4,2 V para 3,3 V. Essa escolha se deve a baixa eficiência de conversão dos circuitos integrado (CI) 1117 normalmente utilizados para essa finalidade, evitando perdas desnecessárias de potência na adequação da tensão de alimentação da PCI. Isso interfere diretamente na eficiência energética do sistema como um todo, que não dissipará tanta potência na forma de calor, possibilitando maior tempo de autonomia do dispositivo.

Além disso, para proporcionar a recarga segura do equipamento, foram adicionados módulos TP4054, responsáveis por regular o carregamento das baterias, evitando a carga acima da capacidade nominal das baterias, que a longo prazo diminui sua vida útil. Essa proteção é imprescindível, visto que as baterias são sensíveis ao manuseio incorreto e correspondem também ao maior custo financeiro do sistema. Por fim, para garantir a conexão correta da fonte de carregamento, foi adicionado um conector Jack P4, que será coberto com borracha de vedação removível, de forma a proteger o

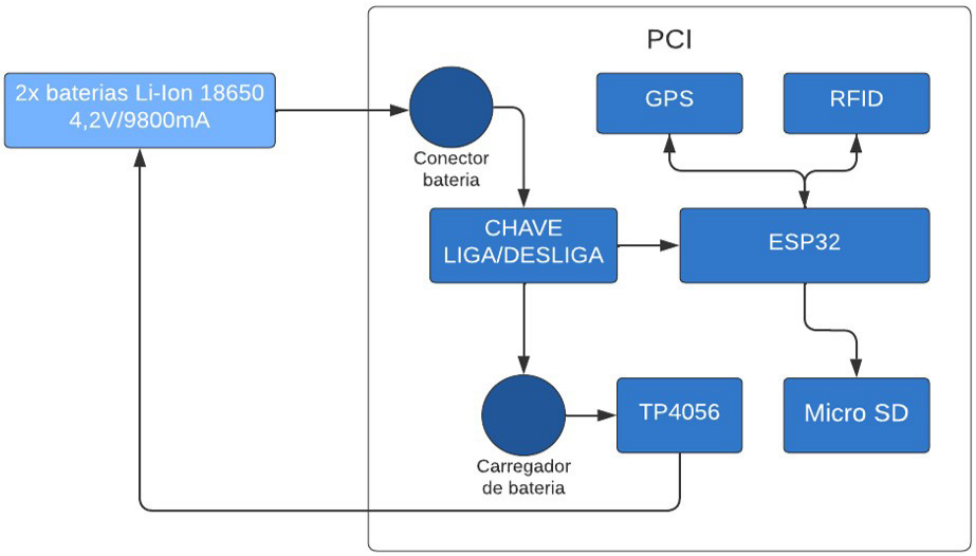


Figura 1. Esquema de diagrama de blocos do equipamento desenvolvido.

equipamento de umidade e poeira, uma vez que o equipamento ficará exposto ao ar livre em campo.

O circuito do protótipo foi desenvolvido em software ECAD (*Eletronic Computer-Aided Design*) dedicado para projetar estruturas eletrônicas, conforme ilustra a Figura 2. Esse arquivo guia o desenho da placa de circuito impresso (Figura 2a). Um layout para a PCI do sistema embarcado pode ser observado na Figura 2b. A projeção das trilhas (Figura 2c) pode ser vista em uma das faces da PCI, que foi gravada em uma CNC (*Computer Numeric Control*) de circuitos impressos em uma placa de fibra de vidro cobreada.

O layout foi projetado para confecção em placa de fibra de vidro com revestimento em cobre dupla face. Isso reduz as medidas totais da PCI e possibilita o enclausuramento da eletrônica embarcada em uma caixa patola de modelo PBR-100 (Figura 3). Desse modo, o projeto ganha proporções relativamente pequenas, que não atrapalham o trabalho dos funcionários que utilizarão o dispositivo durante a colheita.

A fixação do protótipo desenvolvido nas sacolas de colheita foi realizada por meio de uma presilha fixadora de cinto de segurança, comumente utilizada para ajustar os cintos de segurança automotivos para crianças. Essa presilha (Figura 3a) possuía medidas adequadas para atender as dimensões do modelo de caixa (Figura 3b) nesse projeto. Isso possibilita o enclausuramento da eletrônica embarcada em uma caixa patola, garantindo a proteção do circuito contra umidade, poeira e impactos causados pelo usuário no momento da coleta de frutas. A confecção do projeto final apresentou um custo total de aproximadamente R$ 303,19 (podendo variar conforme cotação realizada em julho de 2022).

Por fim, um circuito para teste em bancada foi executado para certificar o funcionamento da integração

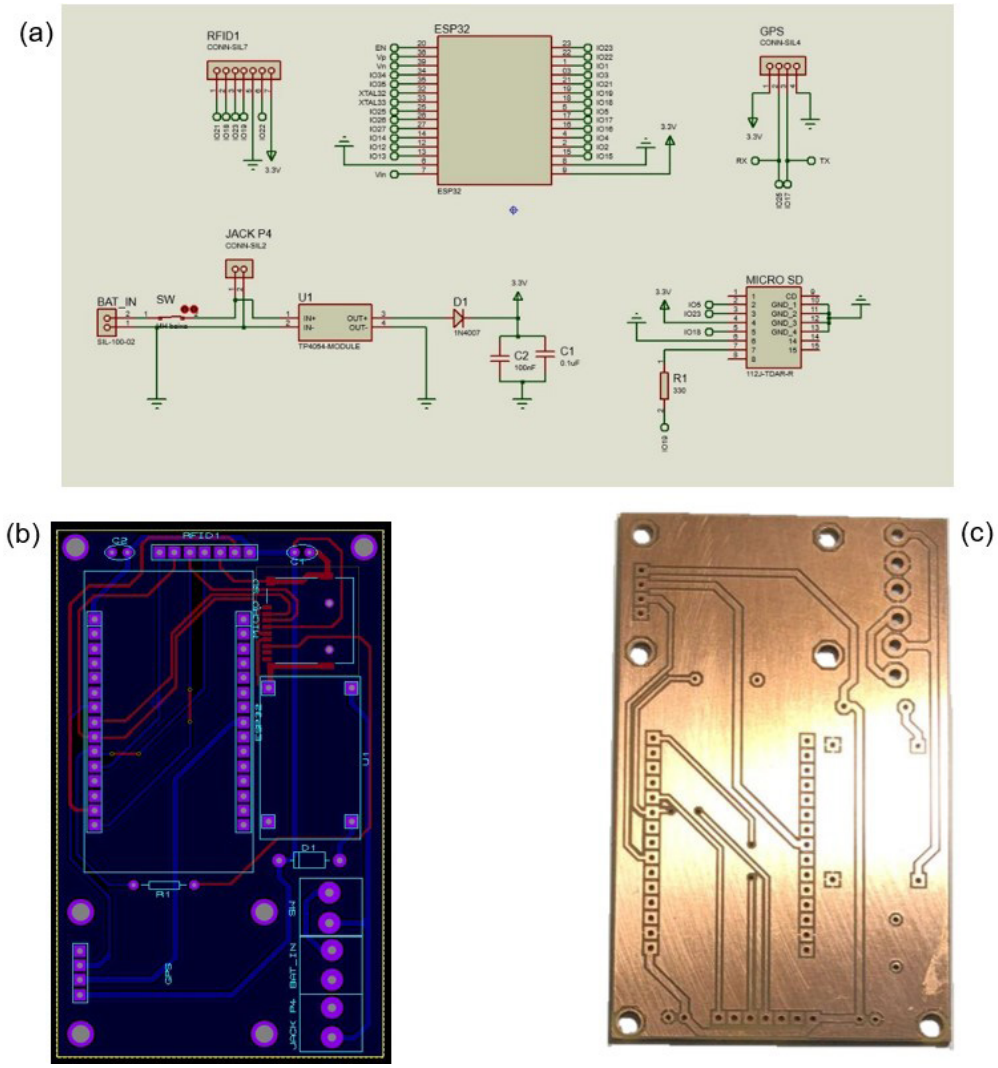


Figura 2. (a) Circuito esquemático para a PCI do sistema embarcado; (b) Layout para a PCI do sistema embarcado; (c) Foto de um lado da PCI do sistema embarcado.

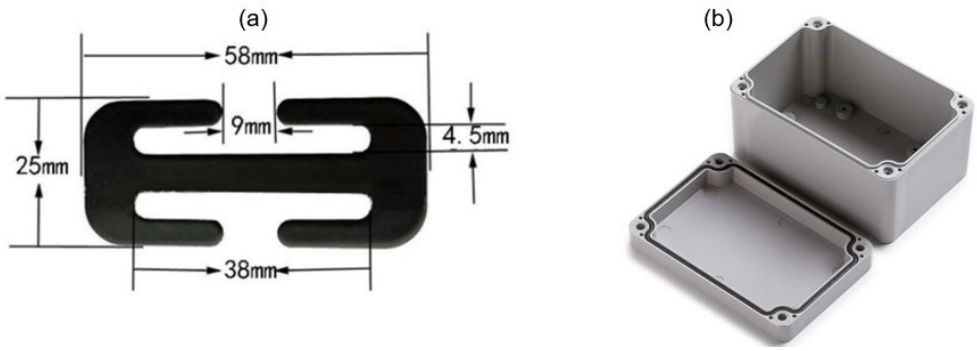


Figura 3. (a) Presilha fixadora de cinto de segurança; (b) Caixa patola modelo PBR-100.

do hardware com o código elaborado no ambiente de desenvolvimento Arduino IDE para o ESP32, como mostrado na Figura 4.

Nessa etapa todos os componentes eletrônicos foram avaliados para quantificar todos os problemas referentes a anomalias que poderiam ocorrer em campo experimental e a duração da alimentação de energia para o ótimo funcionamento do sistema. Em seguida foi realizada a montagem final do protótipo, sendo o mesmo replicado para eventuais testes em condições de trabalho.

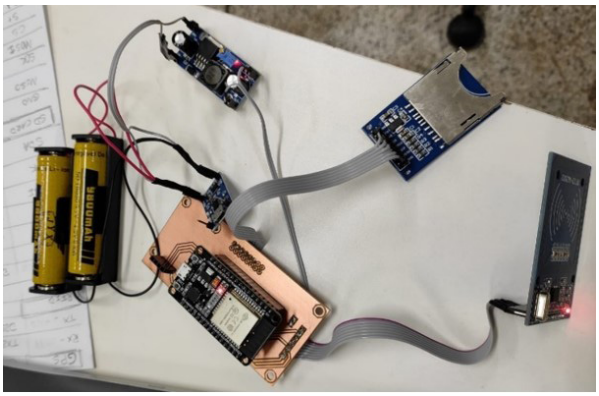


Figura 4. Circuito de teste em bancada de laboratório.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para os testes preliminares de campo em condições de operação os protótipos (dispositivo desenvolvido) apresentavam um número de identificação e foram acoplados a sacolas de coleta de maçãs utilizadas por funcionários (conforme descrito no item anterior), que realizam a colheita manual dos frutos. Os frutos colhidos foram descarregados em caixas previamente identificadas a partir de um cartão RFID, com seu respectivo número. No momento da descarga feita pelo funcionário, o módulo RFID do equipamento presente na sacola recebe o sinal do cartão RFID acoplado à caixa. Assim, um registro em arquivo de texto armazena os dados no cartão de memória micro SD, permitindo posteriormente a identificação do número da caixa e quantidade de descarregamentos feitos nela. O receptor GPS também fornece leitura do posicionamento (latitude e longitude) do funcionário em intervalos de tempo determinados, bem como a data e hora corrente no momento da coleta. Esses dados foram importados para um sistema de armazenamento e utilizados para geração de mapas temáticos de produtividade.

A análise geoestatística em sua essência contém como característica principal o semivariograma. Nesse sentido, a AgDataBox API processa as representações gráficas, sendo que a primeira envolveu os 12 (doze) melhores modelos que foram selecionados durante as comparações efetuadas pela API (exponencial, esférico e gaussiano) (Bazzi et al., 2019). O sistema apresenta uma tabela contendo todos os registros das análises realizadas, sendo as informações (código, modelo e método, contendo os valores de ICE, de contribuição, de alcance, erro médio, desvio padrão e o valor da ISI) armazenadas e processadas requisitando-se a API para a interpolação de dados pelo método de krigagem ordinária (KRI) (Chilès; Desassis, 2018; Wackernagel, 1995).

Testes experimentais foram realizados em Vacaria, RS, Brasil, em duas áreas de cultivo de maçã. Após a etapa de colheita e processamento dos dados coletados no campo, foi possível gerar um layout geográfico dos dados obtidos por meio do sistema embarcado, conforme mostra a Figura 5.

Cada ponto colorido representa uma posição obtida pelo aparelho no momento em que a colheita estava sendo realizada em relação ao bin central que está recebendo as frutas da sacola de colheita instrumentada naquele momento. As diferentes cores representam que os dispositivos deixam de reconhecer o bin

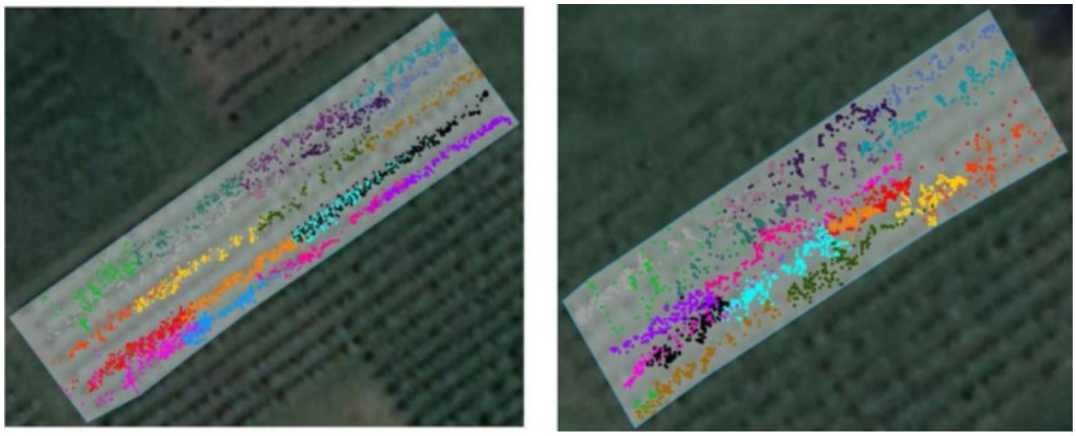


Figura 5. Representação gráfica dos mapas de mobilidade dos colhedores referente à colheita ocorrida nos dias 16 a 17 de janeiro de 2020 no talhão. Cada cor observada nas áreas A e B indica o grupo de dados centralizados em um mesmo bin de colheita e sua nuvem de pontos, que demonstra a mobilidade e localização das sacolas de colheita de maçã contendo o dispositivo eletrônico. Mudança de cores indica que o dispositivo detectou que passou a contribuir com o bin seguinte no pomar.
Fonte: (Bazzi et al., 2022).

	ID_EQUIPAMENTO	ID_CAIXA	DATA	HORA	LONGITUDE	LATITUDE
2	0004	00000	17/01/2020	10:40:23	-50.881943	-28.515100
3	0004	00000	17/01/2020	10:40:28	-50.881874	-28.515156
4	0004	00000	17/01/2020	10:40:31	-50.881874	-28.515156
5	0004	00000	17/01/2020	10:40:34	-50.881874	-28.515156
6	0004	00001	17/01/2020	10:40:36	-50.881874	-28.515156
7	0004	00000	17/01/2020	10:40:39	-50.881874	-28.515156
8	0004	00000	17/01/2020	10:40:42	-50.881889	-28.515165
9	0004	00000	17/01/2020	10:40:45	-50.881889	-28.515186
10	0004	00000	17/01/2020	10:40:48	-50.881889	-28.515186
11	0004	00002	17/01/2020	10:40:50	-50.881748	-28.515207

Figura 6. Conjunto de dados coletados pelo sistema, sendo ID_equipamento o número do dispositivo embarcado na sacola; ID caixa é o número do bin que está recebendo a fruta da daquela sacola; Data e hora são setadas para coleta de dados a cada 5 segundos; Longitude e latitude em UTM.
Fonte: Bazzi et al., 2022.

inicialmente receptor das frutas quando as sacolas passam a ser contribuintes dos demais bins de colheita, pois ao se aproximarem dos bins instrumentados, o código identificador é alterado no banco de dados. Observa-se que existe na imagem uma sobreposição de pontos, esse efeito ocorre devido à quantidade de funcionários transportando o sistema embarcado em uma mesma linha de colheita, devido ao processo de colheita simultânea realizada por inúmeros funcionários. Todavia, em trabalhos futuros, o sistema deve ser otimizado para minimizar esse problema e permitir maior visibilidade da mobilidade sobre a área processada, permitindo a melhor identificação de pontos com sobreposição.

O sistema desenvolvido fazendo uso de tecnologias computacionais é capaz de armazenar os dados de colheita de culturas perenes (Figura 6), coletados por meio de um dispositivo eletrônico de rastreamento, e executar diferentes métodos de interpolação que podem representar e estimar a produtividade de uma determinada área (Figura 7). O cálculo da estimativa da produtividade é executado a partir de um conjunto de dados que representam uma amostra referente aos dados de colheita. Por meio da integração do sistema com a AgDataBox API foi possível realizar análises geoestatísticas dos dados, bem como a geração de mapas de produtividade, fazendo uso de métodos tradicionais como a KRI (Bazzi et al., 2019, 2022),

Na Figura 6 são apresentados, da esquerda para a direita, os mapas de pontos amostrais e o mapa de produtividade interpolado pelo método (KRI). O mapa temático gerado possui uma legenda e é dividido em uma escala de três classes de cores diferentes, para representar o intervalo de valores relacionados. Essa informação torna-se importante por facilitar a interpretação das informações coletadas pelo usuá-

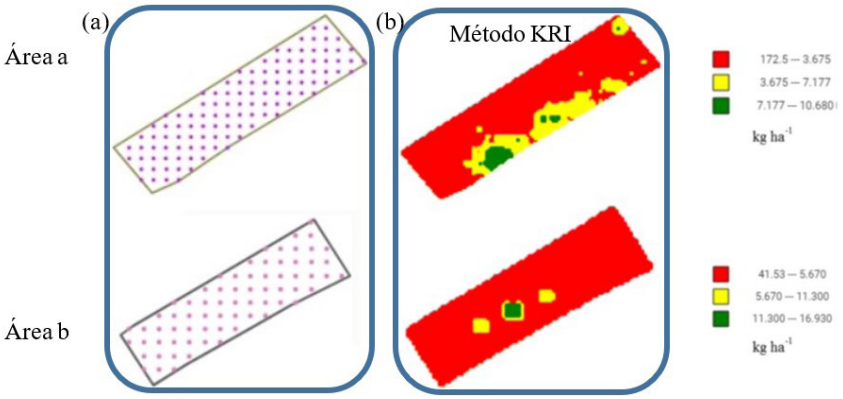


Figura 7. (a) Representação gráfica dos mapas de pontos amostrais; (b) Representação gráfica dos mapas de produtividade interpolados pelo método de krigagem ordinária, referente à colheita ocorrida nos dias 16 a 17 de janeiro de 2020 no talhão
Fonte: Bazzi et al., 2022.

rio do sistema. Dessa forma, os pontos de maior e menor produtividade podem ser analisados para a otimização da produção de diferentes culturas. Contudo, foi demonstrado em um recente trabalho utilizando a primeira fase do dispositivo desenvolvido o uso de dois métodos para gerar o mapa de produtividade, demonstrando que a maior precisão para a formação das imagens temáticas é altamente depende dos conjuntos de dados espaciais coletados (Bazzi et al., 2022). Mesmo assim, observando-se o mapa de produtividade (Figura 6b), notamos que as áreas de maior produtividade (representada na cor verde) curiosamente se encontram em posições de maior sobreposição identificadas pelo protótipo desenvolvido (ver Figura 5), sugerindo que, além do método, a quantidade de pontos amostrais e a precisão do equipamento que realiza a coleta de dados são extremamente importantes para dar maior robustez e qualidade do tratamento das informações coletadas em campo.

Nessa primeira fase de desenvolvimento do protótipo identificou-se a dificuldade de transferir os dados in loco uma vez que eles eram armazenados em um micro SD. Para contornar essa lacuna, a solução foi realizar a comunicação via Bluetooth, que ocorre no atual dispositivo de forma satisfatória, sem a necessidade de desmontar ou abrir o equipamento para resgatar os dados coletados. Testes de resistência a impacto necessitam ser realizados, assim como da maior duração de autonomia de energia, uma vez que o mesmo dispositivo deve ser capaz de fornecer as informações na colheita sem manutenção ou reparo para trocas de baterias. Trabalhos futuros dedicados no aprimoramento do protótipo tendem a estudar a eficiência na maior precisão da coleta e transferência de dados, dessa forma, testes com maior duração em campo para outras culturas irão potencializar o uso e identificar novos desafios que possam reduzir o tempo nas estratégias de colheita e produção, visando a sustentabilidade do ecossistema.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse estudo inicial desenvolveu-se um sistema embarcado que possibilita a coleta e armazenagem de dados de interesse de produtividade, para análise de geoestatística. O sistema embarcado desenvolvido permite realizar coleta e armazenamento de dados que serão utilizados, posteriormente, para a construção de mapas temáticos por meio do uso do AgDataBox API. Isso foi possível por meio dos mecanismos de georreferenciamento e identificação das caixas que recebem a colheita de maçãs. Além disso, o planejamento do hardware para a especificação de longa autonomia possibilitará o uso do equipamento em campo com previsão de duração de carga das baterias por 24 h. Espera-se, assim, facilitar o procedimento de colheita dos frutos em campo sem interrupção do trabalho.

Observou-se que para aumentar a eficiência do projeto a comunicação sem fio BLE (*Bluetooth Low Energie*) do ESP32 se faz necessária, sendo essa utilizada na rotina de programação. Isso permite que o protótipo entre em modo de economia de energia (*sleep*), fazendo com que o sistema possa ficar desativado por um determinado tempo. Essa tecnologia foi desenvolvida para auxiliar aplicações que necessitam enviar poucas informações e economizar energia, alinhando-se à proposta desse projeto de desenvolvimento.

Testes de campo previamente realizados mostraram que o dispositivo possui boa reprodutibilidade e alta eficiência no fornecimento de dados de mobilidade. Contudo, para maximizar o dispositivo, pretende-se em pesquisas futuras desenvolver modelos capazes de identificar quais regiões da área cultivada são

mais produtivas, de modo a melhorar o manejo de insumos e recursos humanos no talhão. Assim, identificamos por meio do desenvolvimento desse sistema que as inovações tecnológicas no campo possibilitam aumentar a produtividade e auxiliam o monitoramento da colheita manual em tempo real, gerando novas tomadas de decisão com maior velocidade no campo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Parque Tecnológico Itaipu – FPTI/BR pelo aporte financeiro e a concessão de bolsas de estudo. E à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Medianeira pelo suporte referente à pesquisa desenvolvida.

REFERÊNCIAS

Abbasi, R.; Martinez, P.; Ahmad, R. The digitization of agricultural industry – a systematic literature review on agriculture 4.0. **Smart Agricultural Technology**, v. *2*, p. 100042, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100042.

AZEVEDO JUNIOR, W. C.; Rodrigues, M.; Silva, D. C. C. Does agricultural efficiency contribute to slowdown of deforestation in the Brazilian Legal Amazon? **Journal for Nature Conservation**, v. *65*, p. 126092, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jnc.2021.126092.

Bazzi, C. L.; JASSE, E. P.; MAGALHÃES, P. S. G.; MICHELON, G. K.; SOUZA, E. G.; SCHENATTO, K.; SOBJAK, R. AgDataBox API – Integration of data and software in precision agriculture. **SoftwareX**, v. *10*, p. 100327, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.softx.2019.100327.

Bazzi, C. L.; MARTINS, M. R.; CORDEIRO, B. E.; GEBLER, L.; SOUZA, E. G.; SCHENATTO, K.; PAULA FILHO, P. L.; SOBJAK, R. Yield map generation of perennial crops for fresh consumption. **Precision Agriculture**, v. *23*, n. 2, p. 698-711, 2022. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-021-09855-2.

Betzek, N. M.; SOUZA, E. G.; BAZZI, C. L.; SCHENATTO, K.; GAVIOLI, A.; MAGALHÃES, P. S. G. Computational routines for the automatic selection of the best parameters used by interpolation methods to create thematic maps. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *157*, p. 49-62, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.004.

Boursianis, A. D.; PAPADOPOULOU, M. S.; DIAMANTOULAKIS, P.; LIOPA-TSAKALIDI, A.; BAROUCHAS, P.; SALAHAS, G.; KARAGIANNIDIS, G.; WAN, S.; GOUDOS, S. K Internet of Things (IoT) and Agricultural Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in smart farming: a comprehensive review. **Internet of Things**, v. *18*, p. 100187, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100187.

Chilès, J.-P.; Desassis, N. Fifty years of kriging, In: DAYA SAGAR, B. S.; CHENG, Q.; AGTERBERG, F. (eds.). **Handbook of mathematical geosciences:** *fifty years of IAMG.* Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 589-612. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-319-78999-6_29.

Cobbenhagen, A. T. J. R.; ANTUNES, D. J.; VAN DE MOLENGRAFT, M. J. G.; HEEMELS, W. P. M. H. Opportunities for control engineering in arable precision agriculture. **Annual Reviews in Control**, v. *51*, p. 47-55, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.01.001.

Dall'Agnol, R. W.; MICHELON, G. K.; BAZZI, C. L.; MAGALHÃES, P. S. G.; SOUZA, E. G.; BETZEK, N. M.; SOBJAK, R. Web applications for spatial analyses and thematic map generation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *172*, p. 105374, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105374.

Fukase, E.; Martin, W. Economic growth, convergence, and world food demand and supply. **World Development,**, Oxford, v. *132*, p. 104954, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.104954.

Martinelli, L. A.; NAYLOR, R.; VITOUSEK, P. M.; MOUTINHO, P. Agriculture in Brazil: impacts, costs, and opportunities for a sustainable future. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. *2*, n. 5-6, p. 431-438, 2010. DOI: http://doi.org/10.1016/j.cosust.2010.09.008.

Mulla, D. J. Modeling and mapping soil spatial and temporal variability. In: LIN, H. (ed.). **Hydropedology**. Boston: Academic Press, 2012. chap. 20, p. 637-664. DOI: http://doi.org/10.1016/B978-0-12-386941-8.00020-4.

Pellegrina, H. S. Trade, productivity, and the spatial organization of agriculture: Evidence from Brazil. **Journal of Development Economics**, v. *156*, p. 102816, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2021.102816.

Saath, K. C. O.; Fachinello, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. *56*, n. 2, p. 195-212, 2018. DOI: http://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790560201.

Van Dijk, M.; MORLEY, T.; RAU, M. L.; SAGHAI, Y. A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010-2050. **Nature Food**, v. *2*, n. 7, p. 494-501, 2021. DOI: http://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9.

Wackernagel, H. Ordinary kriging, In: WACKERNAGEL, H. (ed.). **Multivariate geostatistics:** *an introduction with applications. Berlin: Springer Berlin Heidelberg*, 1995. p. 74-81. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-662-03098-1_11.

9

Controladores e algoritmos computacionais embarcados para agregação de qualidade no uso de pulverizadores terrestres em aplicação localizada

Embedded controllers and algorithms in boom sprayers for quality aggregation in localized applications

Heitor Vinicius Mercaldi[1], Deniver Reinke Schutz[2], Elmer Alexis Gamboa Peñaloza[3], Vilma Alves de Oliveira[4], Paulo Estevão Cruvinel[5]

[1] *Doutor, Universidade Federal de São Carlos, Embrapa Instrumentação, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, e-mail: heitor@ufscar.br*

[2] *Mestre, Universidade de São Paulo, Embrapa Instrumentação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil, e-mail: deniver@usp.br*

[3] *Doutor, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, Embrapa Instrumentação, Universidade de São Paulo, Brasil, e-mail: elmeralexis@gmail.com*

[4] *Profa Titular, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, e-mail: voliveira@usp.br*

[5] *Doutor, Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP, Brasil, e-mail: paulo.cruvinel@embrapa.br*

RESUMO

O uso de tecnologias avançadas, como as utilizadas na agricultura de precisão, tem aumentado a produtividade e reduzido os custos de produção. Nesse sentido, o desempenho das máquinas agrícolas, bem como a qualidade da aplicação de agrotóxicos, vem melhorando a eficiência no controle de pragas. Neste capítulo, é apresentado um conjunto de controladores eletrônicos avançados para pulverizadores que operam em taxa variada, que foram desenvolvidos no Laboratório de Pulverização Agrícola de Precisão, administrado em parceria estabelecida entre a Embrapa Instrumentação e o Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade de São Paulo. Nesse contexto, são apresentados não apenas os métodos empregados, mas também resultados comparativos da implementação de três diferentes controladores eletrônicos para pulverizadores, que envolvem as leis de controle para regulação de pressão e vazão para melhorar a qualidade da aplicação. Além disso, são apresentados soft-sensores capazes de prever descritores de qualidade de pulverização, bem como auxiliar na definição de condições adequadas para operação em tempo real. Adicionalmente, são apresentadas análises comparativas para controladores eletrônicos baseados em diferentes configurações, ou seja, controlador proporcional integral diferencial (PID), controlador preditivo generalizado (GPC) e controlador preditivo generalizado com lógica difusa (GPC-fuzzy). Os resultados experimentais demonstram as vantagens na utilização de técnicas de controle mais avançadas. A implementação dos controladores utilizando microcontroladores avançados baseados em um conjunto reduzido de instruções (ARM) demonstra a viabilidade da implementação embarcada para tomada de decisão em tempo real. Este capítulo apresenta resultados completos e validados.

Palavras-chave: controladores inteligentes; pulverizadores; agrotóxicos; controle de pragas; soft-sensor; erro de aplicação.

ABSTRACT

The use of advanced technologies, such as those employed in precision agriculture, has increased productivity and reduced production costs. In this sense, the performance of agricultural machines, as well as the application quality of pesticides, has been improving pest control efficiency. In this Chapter, a set of advanced electronic controllers for sprayers is presented, which was developed at the Precision Agricultural Spraying Laboratory, managed by the

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000085

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

Embrapa Instrumentation and the Department of Electrical and Computer Engineering of the University of São Paulo. In this context, not only methodological designs but also comparative results from the implementation of three different electronic controllers for sprayers are presented, which involve the control laws for the regulation of pressure and flow to improve application quality. Furthermore, soft-sensors capable of predicting spray quality descriptors, as well as helping to define suitable conditions for real-time operation, are presented. Additionally, design and comparative analysis for electronic controllers based on the Proportional-Integral-Differential (PID), Generalized Predictive Controller (GPC) and GPC-Fuzzy are presented. The experimental results showed advantages in using such electronic controllers, which have been implemented using the Advanced RISC Machine (ARM) microcontrollers, i.e., to make their embedded intelligent algorithms viable for real time decision making. This Chapter presents complete and validated results.

Keywords: Intelligent controllers; sprayers; pesticides; pest control; soft-sensor; application error.

1 INTRODUÇÃO

Os sensores atuadores e controladores são dispositivos utilizados para automatizar processos. Têm por objetivo melhorar a produtividade de um determinado sistema e aumentar sua qualidade, minimizando riscos e oferecendo controle sobre sua operação, o que envolve a segurança de processos. De fato, o controle é o ato de comandar, dirigir, ordenar, ou mesmo corrigir no tempo o valor ou faixa de valores de uma variável de um determinado sistema.

Na prática, os processos a serem controlados em geral apresentam um comportamento dinâmico, referindo esse conceito a uma situação ou estado que é dependente do tempo. O estudo de um sistema dinâmico pode ser entendido como sendo o estudo do comportamento, em função do tempo, de grandezas relacionadas com uma parte de seu universo de atuação. Nesse sentido, o uso de um controlador de processos possibilita gerar um sinal ou ação de controle que leva a variável do processo para uma dada referência, assim como deve ser capaz de lidar com perturbações (Oliveira et al., 2017).

Os controladores utilizados em pulverizadores, tanto para aplicações convencionais como para as aplicações em taxa variada, podem utilizar ou não informações de realimentação sobre o volume aplicado, o qual é dependente das informações da pressão ou de vazão (Cruvinel et al., 2016). O resultado das operações de aplicação pode ser analisado pela deposição, cobertura, deriva e eficácia do controle desejado (Christofoletti, 1999). Porém, tanto fatores internos ao pulverizador como externos interferem no processo de deposição dos agrotóxicos no alvo, podendo causar erros de aplicação. O tamanho de gota é um dos principais descritores que caracterizam a eficiência de uma aplicação. Para gotas pequenas, obtém-se maior cobertura superficial e melhor uniformidade de distribuição da calda, mas o efeito de deriva pode ser ampliado, o que também inclui a potencialização do efeito de evaporação. Por outro lado, as gotas grandes apresentam maior potencial para escorrer da superfície da folha, antes mesmo de o produto ser absorvido no alvo desejado (Suzumura; Cruvinel, 2005).

A aplicação de agrotóxicos, quando inserido no conceito de agricultura de precisão, deve considerar fatores relacionados à própria máquina e sua precisão, bem como fatores externos. Shiratsuchi e Fontes (2002) definem a aplicação de agrotóxicos agrícolas como sendo a sobreposição de um determinado alvo por um produto biologicamente ativo, em quantidade adequada, de forma econômica e com riscos mínimos de contaminação. Nesse sentido, a tecnologia de aplicação de agrotóxicos compreende o uso de conhecimentos científicos, técnicas e métodos para a precisa colocação do produto biologicamente ativo no alvo de interesse (Cunha; Carvalho, 2005). Adicionalmente aos aspectos mencionados, o custo elevado dos agrotóxicos, que pode chegar a 30% do custo total de produção em uma lavoura, há necessidade de se buscar o seu uso racional e a melhoria da qualidade de aplicação, o que inclui prioritariamente a minimização de erros e o uso das boas práticas para que se possa atuar considerando ganhos de eficácia, assim como de eficiência no controle das pragas em uma área de lavoura.

Nesse contexto, a avaliação dos depósitos de gotas sobre alvos tem se configurado como um dos métodos mais representativos para se avaliar a qualidade da aplicação de agrotóxicos para o controle fitossanitário (Yasin, 2012; Leadbeater, 2015). Se junta a esse método a aplicação de soft-sensores, os quais para a área em questão emergiram recentemente, com tra-

balhos originais realizados no Brasil (Penaloza et al., 2017; 2021). O uso de soft-sensores viabiliza não somente a caracterização das condições de operação como também a escolha dos descritores de qualidade da pulverização. Eles possibilitam estimar a qualidade de uma aplicação tomando por base parâmetros envolvidos no espectro de gotas decorrentes de uma aplicação e um segundo arranjo relacionado à definição dos parâmetros de regulagem do pulverizador, de forma a se estabelecer a priori condições de regulagem de pulverizadores para atingir a qualidade de aplicação desejada.

Para processos de pulverização que considerem a aplicação em taxa variada, há necessidade de se controlar o volume da calda pulverizada em função da localização espacial em que se encontre o pulverizador na área da lavoura, vindo a ser importante considerar embarcar os controles eletrônicos junto aos sistemas hidráulicos que compõem os pulverizadores.

O controle de pragas agrícolas é entendido como uma tarefa de alta complexidade, uma vez que envolve ações sobre a eficácia dos pulverizadores (Pereira, 2006), garantia da qualidade da aplicação (Matthews, 1992), avaliação de fatores inerentes às características da máquina que transporta o pulverizador (Bonadio et al., 2015; Cruvinel et al., 2020) e de seu operador (Sutherland et al., 1990), fatores climáticos (Thistle et al., 1998) e fatores inerentes aos insumos que trazem os ingredientes ativos (Chaim, 2009) e seus registros no Agrofit (Mapa, 2022). Logo, a qualidade na aplicação é atrelada às características operacionais dos pulverizadores. Segundo Senar (2018), os principais parâmetros operacionais que influenciam o processo de operação são: tamanho de gota, volume de aplicação (taxa de aplicação), vazão, pressão, velocidade de trabalho, faixa de aplicação e altura da barra do pulverizador.

Os avanços na tecnologia de aplicação têm trazido avanços para a melhoria do processo, mas ainda há muito para ser realizado para se garantir melhor rendimento, uso racional desses insumos e menores custos operacionais (Dornelles et al., 2009). O cuidado com a lavoura requer proteção contra pragas e doenças, assim como a manutenção de uma adequada fertilidade do solo. De fato, existe uma grande variedade de tipos de pulverizadores que são disponíveis tanto no mercado nacional como no internacional. A escolha do tipo de pulverizador está associada ao tamanho de área e às aplicações a que se destinam, ou seja, o tipo da lavoura. Dentre esses se encontram os pulverizadores manuais (geralmente com carga útil de 0,25 até 1,0 l), pulverizador costal (operação manual, motorizado ou pressurizado), pulverizador de barra (tracionado e acoplado a trator), pulverizador autopropelido (que dispensa o uso do trator e pode operar com barras longas da ordem de 30 m e vários bicos pulverizadores), também considerando a inclusão de atomizadores, cuja velocidade de ar gerada durante seu funcionamento lança o produto (calda ou pó) a grandes distâncias. Atualmente, nas aplicações terrestres, o pulverizador autopropelido é o mais utilizado nas propriedades de grande porte, uma vez que seu uso possibilita alcançar maiores áreas e rendimentos.

Os controladores de pulverização eletrônicos, mais comuns em pulverizadores modernos, podem utilizar calda pronta (água + agrotóxicos) ou injeção indireta. Os que utilizam calda pronta consideram em seu arranjo instrumental a injeção da calda pela bomba hidráulica do pulverizador já preparada previamente nas barras de pulverização, podendo a mesma ser admitida juntamente com o ar externo. Já na injeção direta, o produto ativo é injetado de forma que se possa preparar a calda que será aplicada logo após seu preparo e envio à barra onde se encontram instalados os bicos pulverizadores. Para essa última configuração é importante observar o tempo de resposta do pulverizador em função da aplicação e praga a ser controlada. Esse tempo está relacionado à dosagem correta em uma aplicação, sendo definido entre a ação de comando para a troca de vazão e sua efetiva ação de mudança nos bicos aplicadores. Assim, variando em função do ponto de injeção do produto ativo no sistema hidráulico, das dimensões da tubulação utilizada no pulverizador, da densidade e viscosidade da calda e outras características envolvidas nas conexões entre partes do sistema pulverizador (Antuniassi, 1999). Vondricka e Lammers (2009) discutem os problemas da injeção direta em conexão com controle em tempo real, propondo melhorias de partes do sistema para reduzir o tempo de resposta nessa modalidade de sistema pulverizador. Os pulverizadores que dispõem do sistema de injeção direta passaram mais recentemente a ser novamente estudados, incluindo a aplicação em taxa variada. Esse sistema permite a variação e o controle da vazão da calda, através das ações das válvulas, bombas de injeção e bomba de pulverização, assim como da dose a ser aplicada, se utilizando técnicas de controle da bomba de injeção (Mercaldi, 2012; Felizardo, 2013). De acordo com Clarke (2018), a demanda pela tecnologia de injeção direta tem sido impulsionada na América do Norte e na Europa, devido a crescentes problemas de resistência a agrotóxicos observados principalmente nas plantas invasoras (Powles, 2008). Trabalhos anteriores também demonstraram sucesso no uso de controladores proporcional integral e/ou derivativo (PID) clássicos e

por escalonamento dos ganhos, utilizando sistemas fuzzy, ou ainda através da inclusão de uma função não linear para sintonia dos ganhos do controlador na regulação da vazão ou da pressão (Mercaldi, 2012; Gonzalez et al., 2012; Pawlowski et al., 2017). A regulação ou controle da taxa de aplicação dos pulverizadores de barra é realizado através de válvulas proporcionais do tipo agulha, borboleta ou esfera (Steward; Humburg, 2000; Felizardo et al., 2016). Os controladores utilizados nos sistemas pulverizadores são em sua grande maioria do tipo PID, em sua forma clássica ou com alterações como o escalonamento dos ganhos para atender critérios de desempenho (Bennur; Taylor, 2010).

Os pulverizadores com injeção direta podem ser divididos em subgrupos de acordo com o local onde ocorre a injeção: central, na barra de seção ou nos bicos pulverizadores. Quanto mais longe estiver o ponto de injeção em relação aos bicos pulverizadores, maior será o tempo de resposta e melhor será a homogeneidade da calda. Por outro lado, aproximar o ponto de injeção dos bicos pulverizadores reduz o atraso de transporte entre a mistura da calda e sua aplicação, logo há uma relação (de custo/benefício) que deve ser observada entre a homogeneidade da calda e o tempo de resposta desejado (Mercaldi, 2012; Mercaldi et al., 2019). Trabalhos que visam melhores soluções ao problema apresentado têm sido desenvolvidos, envolvendo a regulação da vazão da calda com o uso dos controladores preditivos. Felizardo (2013) abordou o uso dessa modalidade de controladores baseando-se no uso do controle preditivo baseado em modelo (MPC, em inglês) para regulação da vazão em um pulverizador de injeção direta.

Recentemente, Mercaldi et al. (2019) e Schutz (2021) apresentaram o desenvolvimento de um controle preditivo generalizado (GPC, em inglês), considerando versões embarcadas em microcontrolador e conjuntos específicos de restrições no modelo de operação, ambos aplicados a sistemas de pulverização em taxa variada com e sem injeção direta, incluindo a possibilidade de simulação da planta usando Hardware-in-the-Loop. Como vantagens do controle preditivo destacam-se possibilidades do tratamento de restrições que podem ser incorporadas no projeto do controlador através do uso de um algoritmo na etapa de otimização da função custo, a capacidade de incluir tempos de atraso e a possibilidade de incluir informações de referências futuras provenientes de um mapa de prescrição. Schutz e coautores (2022) propuseram a construção de sistema inteligente baseado em fuzzy-Mamdani (Mamdani; Assilian, 1975) para o escalonamento dos parâmetros de ajuste do controlador GPC.

Este capítulo trata prioritariamente do desenvolvimento de controladores eletrônicos que foram testados e validados para uso em pulverizadores agrícolas, os quais agregam robustez operacional e confiabilidade, assim como qualidade ao processo de aplicação para o controle de pragas. Também apresenta integração de soft-sensores para estimativas a priori dos parâmetros de um pulverizador para se inferir a qualidade desejada para um processo de aplicação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

a. Sistema de desenvolvimento de pulverizadores agrícolas

Para validar os controladores e os soft-sensores foi utilizada uma plataforma desenvolvida pela Embrapa Instrumentação em parceria com a Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. A plataforma utilizada para análise e desenvolvimento de pulverizadores funciona como um sistema de desenvolvimento de pulverizadores agrícolas (SDPA) e possui um controlador embarcado de tempo real da *National Instruments*® (NI-cRIO), o qual é programado na plataforma LabView® (National Instruments, 2019). Essa arquitetura apresenta quatro componentes principais: um processador em tempo real, uma matriz de portas programáveis pelo usuário (FPGA, em inglês), entradas e saídas (E/S) modulares e ferramentas de software adequado para o desenvolvimento ou programação de sistemas de controle, processamento digital de sinais, controle de processos, sistemas supervisórios e de aquisição de dados (Cruvinel et al., 2016). O SDPA (Figura 1) é também baseado em uma configuração de um pulverizador hidráulico de barra modular e possui um avançado sistema de integração que permite o projeto de arquiteturas envolvendo conexões de componentes e dispositivos hidráulicos, bombas hidráulicas e elétricas, mecânica de precisão, circuitos eletrônicos e algoritmos computacionais.

A arquitetura desse sistema de desenvolvimento foi estabelecida considerando o conceito de instrumentação programável, sendo assim um sistema flexível, capaz de viabilizar a utilização de diferentes circuitos e conexões, possibilitando utilizar a tecnologia de aplicação em sua forma tradicional ou em taxa variada. O microcontrolador STM32F407 foi utilizado para embarcar os controladores PID, GPC e fuzzy GPC para o controle da vazão de calda e de injeção.

b. Controladores PID, GPC e fuzzy GPC

A arquitetura dos controladores PID em diagrama de blocos é apresentada na Figura 2. Essa modalida-

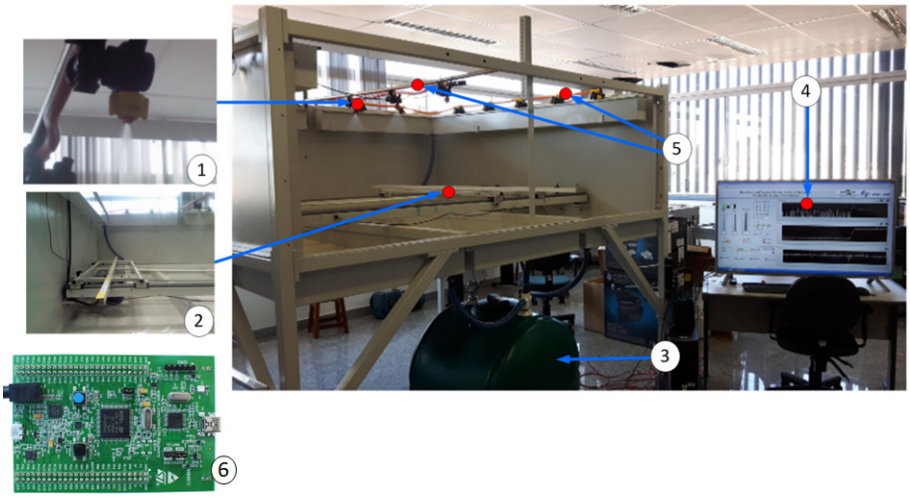


Figura 1. Sistema de desenvolvimento para pulverizadores agrícolas, dedicado à aplicação de insumos líquidos: (1) bico de pulverização, (2) sistema que emula o movimento do pulverizador, (3) tanque de descarte de agrotóxicos, (4) interface supervisória e de aquisição de dados, (5) barras de pulverização, (6) placa para controladores embarcados.

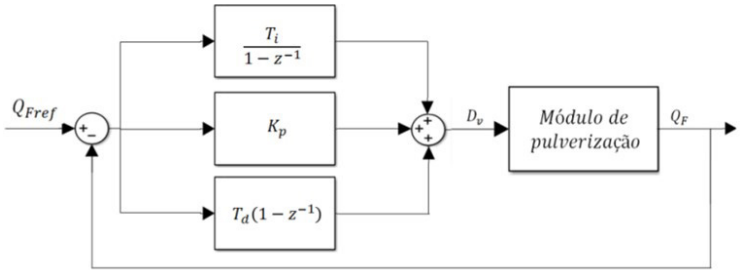


Figura 2. Diagrama de blocos do controlador PID discreto, onde Q_{ref} é a vazão de referência, e o erro, D_v o *duty-cycle* do sinal PWM e Q_f a vazão de calda (adaptado de Mercaldi et al., 2019).

de de controlador apresenta uma ação de controle baseada em operações de integração, diferenciação e multiplicação do erro. Sendo mais utilizados para o controle de vazão de pulverizadores. No caso discreto, a ação de controle $u(k)$ do PID na sua forma fundamental é dada por:

$$u(k)-u(k-1)=q_0e(k)+q_1e(k-1)+q_2e(k-1) \quad (1)$$

em que:

e é o erro, $q_0=K_p\left(1+\frac{T_d}{T_s}\right)$, $q_1=-K_p\left(1+2\frac{T_d}{T_s}-\frac{T_s}{T_i}\right)$ e $q_2=K_p\frac{T_d}{T_s}$, com K_p, T_d e T_i sendo os ganhos proporcional, derivativo e integrativo, respectivamente, e T_s a taxa de amostragem.

Quanto ao controlador preditivo generalizado (GPC), o mesmo foi proposto originalmente por Clarke, Mohtadi e Tuffs (1987). É uma das mais difundidas técnicas utilizadas para controle preditivo em processos industriais. Sua formulação foi baseada em modelo de média móvel autorregressiva controlada e integrada (CARIMA, em inglês), sendo representado na sua forma incremental como:

$$a(z)\Delta y_k=b(z)\Delta u_k+T(z)\zeta_k \quad (2)$$

em que

$$a(z)=1+a_1z^{-1}+a_2z^{-2}+\cdots+a_{na}z^{-na} \quad (3)$$

$$b(z)=b_1z^{-1}+b_2z^{-2}+\cdots+b_{nb}z^{-nb} \quad (4)$$

$$T(z)=t_1+t_2z^{-1}+\cdots+t_{nt}z^{-nt} \quad (5)$$

com $a(z)$ e $b(z)$ sendo respectivamente polinômios de ordem n_a e n_b, $T(z)$ um polinômio de projeto, $\Delta=1-z^{-1}$, ζ_k um ruído branco de média nula, y_k a saída e u_k o sinal de controle. Em (2), fazendo $\tilde{A}(z)=\Delta a(z)$ chega-se em:

$$\tilde{A}(z)=1+\tilde{a}_1z^{-1}+\tilde{a}_2z^{-2}+\cdots+\tilde{a}_{na+1}z^{-na-1} \quad (6)$$

A lei de controle do GPC é obtida da minimização de uma função custo quadrática (Rossiter, 2003). Para sistemas do tipo entrada simples – saída simples (SISO, em inglês), a função custo quadrática é dada por:

$$J(\Delta u,e)=\sum_{k=1}^{N_p}\vec{e}(k+1)\delta\,\vec{e}^{T}(k+1)+\sum_{k=1}^{N_c}\Delta\vec{u}(k)\lambda\,\Delta\vec{u}^{T} \quad (7)$$

em que

δ é o fator de ponderação do erro, e é o erro e λ é o fator de ponderação dos incrementos de controle, Δu, N_p e N_c são o horizonte de predição e o horizonte de controle, respectivamente.

A lei de controle é dada por:

$$\Delta u(k)=E_1^T S^{-1}a \quad (8)$$

em que

$S=\delta H_1^T H_1+\lambda I$ com $H_1=H(1:N_p,1:N_c)$ e

$a=X\left[\,\Delta\vec{u}(k-2)\;\;\vec{y}(k-1)\;\;\vec{r}(k)\,\right]^T$,

$X=\left[\delta H_1^T P\;\delta H_1^T Q-\delta H_1^T L\right]$, $L=[1\;1\cdots 1]^T$ e

$E_1^T=[I\,0\cdots 0]$ com $H=C_A^{-1}C_b$, $P=C_A^{-1}H_b$ e

$Q=-C_A^{-1}H_A$ matrizes de ordem N_pXN_p, N_pXn_b e N_pXn_a, respectivamente. As matrizes C_b, H_b, H_A e C_A de ordem N_pXN_p, N_pXn_b, N_pXn_a e N_pXN_p, nessa ordem, são obtidas através dos polinômios $\tilde{A}(z)$ e $B(z)$ do modelo CARIMA e pelas matrizes Toeplitz e Hankel.

Os vetores identificados com setas y, Δu e r apontando para a esquerda e direita correspondem a elementos passados e futuros da saída do sistema, variação da ação de controle e referência, respectivamente dados por:

$$\vec{y}(k-1)=\left[\,y(k)\;y(k-1)\vdots y(k-n_a)\,\right] \quad (9)$$

$$\Delta\vec{u}(k-2)=\left[\,\Delta u(k-1)\;\Delta u(k-2)\vdots\Delta u(k-n_b+1)\,\right] \quad (10)$$

$$\vec{r}(k)=\left[\,r(k+1)\;r(k+2)\vdots r(k-N_p)\,\right] \quad (11)$$

Visando utilizar a capacidade de incorporação de restrições no GPC e tendo como objetivo sua construção embarcada em microcontroladores, foi essencial a adoção de algoritmos computacionalmente eficientes, ou seja, com capacidade de resolver cálculos de programação quadrática em cada período de amostragem. Desse modo foram utilizados os algoritmos da projeção do gradiente acelerado duplamente (GPAD – *Accelerated Dual Gradient Projection*) e de Gauss-Seidel projetado e modificado (PGS – *Projected Gauss-Seidel* e PGSM – *Projected Gauss-Seidel Modified*) (Mercaldi et al., 2019; Peccin et al., 2019).

Considerando como elemento atuador do módulo de pulverização, uma válvula proporcional do tipo agulha, verificaram-se duas não linearidades principais, a primeira relativa à variação da sua resistência fluídica e a segunda decorrente de uma zona morta. A zona morta é a mais relevante em termos de degradação do desempenho e da precisão dos controladores testados. Para resolver os problemas de baixa precisão de controle na região de zona morta, foi desenvolvido um sistema de controle fuzzy-GPC capaz de diminuir a variação na ação de controle (Schutz, 2022). A Figura 3 apresenta em diagrama de blocos a estratégia do controlador fuzzy-GPC desenvolvido.

O sistema fuzzy, mostrado como parte da Figura 3, tem como entradas o erro e sua variação: E e $E\Delta$, respectivamente, e como saídas $\hat{\lambda}$ e $\hat{\delta}$, as quais geram a estimativa dos pesos λ e δ do controlador fuzzy-GPC a cada iteração. Em Schutz et al. (2022) também é apresentado um algoritmo capaz de realizar a atualização em tempo real desses parâmetros, sem a necessidade de recalcular as matrizes Toeplitz e Hankel do controlador fuzzy-GPC.

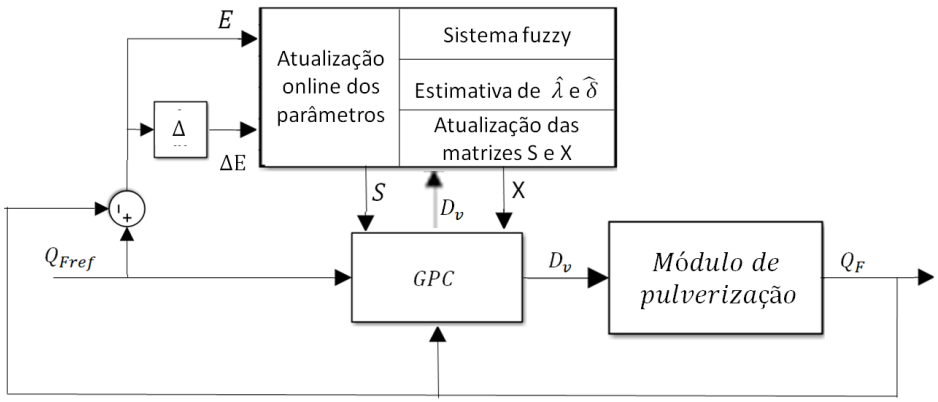


Figura 3. Diagrama de blocos do controlador fuzzy-GPC para o controle do volume de calda de um pulverizador, Q_{ref} vazão de referência, D_v duty cycle do sinal de controle PWM, Q_f vazão de calda, E erro, ΔE variação do erro (adaptado de Schutz et al., 2022).

c. Correção de erros de aplicação em taxa variada

Em pulverizadores de barra, a vazão em cada ponta é dada por:

$$Q_p = \frac{D_p\, v_p\, E}{60000} \tag{12}$$

onde
Q_p é a vazão na ponta [l/min], v_p é a velocidade da ponta [km/h], E é o espaçamento entre as pontas [cm] e D é a taxa de aplicação [l/ha] do agrotóxico.

Para avaliar erros de aplicação foi estabelecida uma trajetória curvilínea do tipo espiral (Figura 4a), onde cada ponto é espaçado do anterior por 10 m (Figura 4b). Para avaliar o o modelo de correção desenvolvido foi considerada a geometria de Ackermann (GA), ou seja, para velocidades suficientemente baixas de forma que não ocorra deslizamento nas rodas (Jazar, 2008).

Para obter as velocidades de cada bico pulverizador foi aplicado um modelo cinemático para o conjunto trator-pulverizador, considerando vetores $r = \begin{bmatrix} x\, y \end{bmatrix}^T$ e $s = \begin{bmatrix} x_p\, y_p \end{bmatrix}^T$, referentes às posições do trator e da barra do pulverizador, respectivamente.

d. Soft-sensores

Alinhado à necessidade de garantir qualidade durante o processo de aplicação foi elaborada uma estratégia baseada em soft-sensores, os quais auxiliam no planejamento das condições de operações da vazão e da pressão dos controladores. As arquiteturas apresentadas em diagramas de blocos da Figura 5 ilustram os elementos para a predição das variáveis que definem a qualidade e ajustes das condições de operação do pulverizador.

Na construção dos soft-sensores foram utilizados método paramétrico de regressão linear e análise de componentes principais (PCA, em inglês). Dados históricos foram obtidos com ensaios laboratoriais com o SDPA, e diferentes tipos de bicos de pulverização foram ensaiados considerando variações de pressão e vazão na barra de pulverização. A calibração dos soft-sensores foi baseada na seleção de dados históricos e filtragem utilizando um algoritmo paramétrico de regressão de vizinhos mais próximos (k–NN, em inglês).

Os resultados desta pesquisa revelam a utilidade de sensores suaves na aplicação de defensivos agrícolas e como base de conhecimento para auxiliar na tomada de decisões agrícolas (Peñaloza et al., 2021).

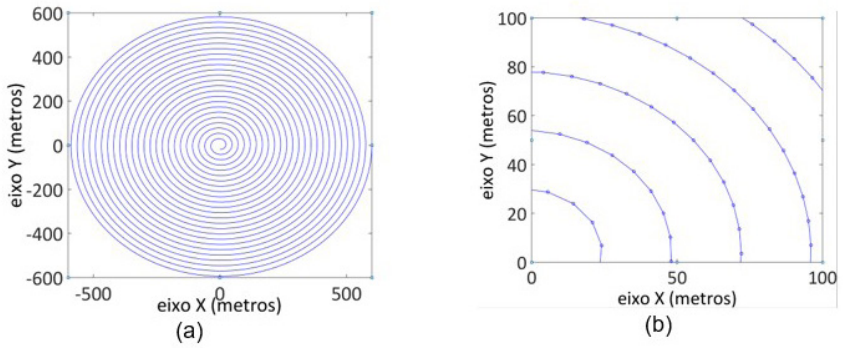


Figura 4. (a) percurso projetado para avaliar o desempenho do conjunto trator pulverizador em trajetórias curvilíneas; (b) detalhe do espaçamento entre os pontos (adaptado de Penãloza, 2014).

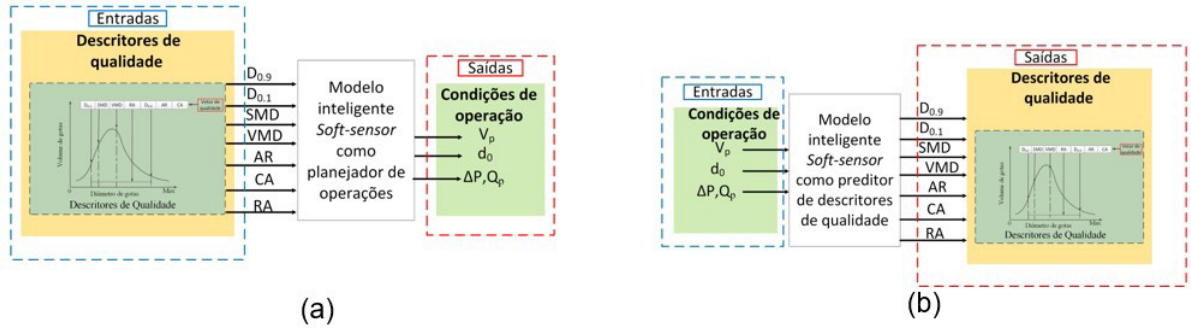


Figura 5. Diagrama esquemático da arquitetura estabelecida para os soft-sensores customizados para a tecnologia de aplicação em controle de pragas agrícolas, sendo em (a) preditor de descritores de qualidade e em (b) planejador de operações (adaptado de Penãloza; Oliveria; Cruvinel, 2021).

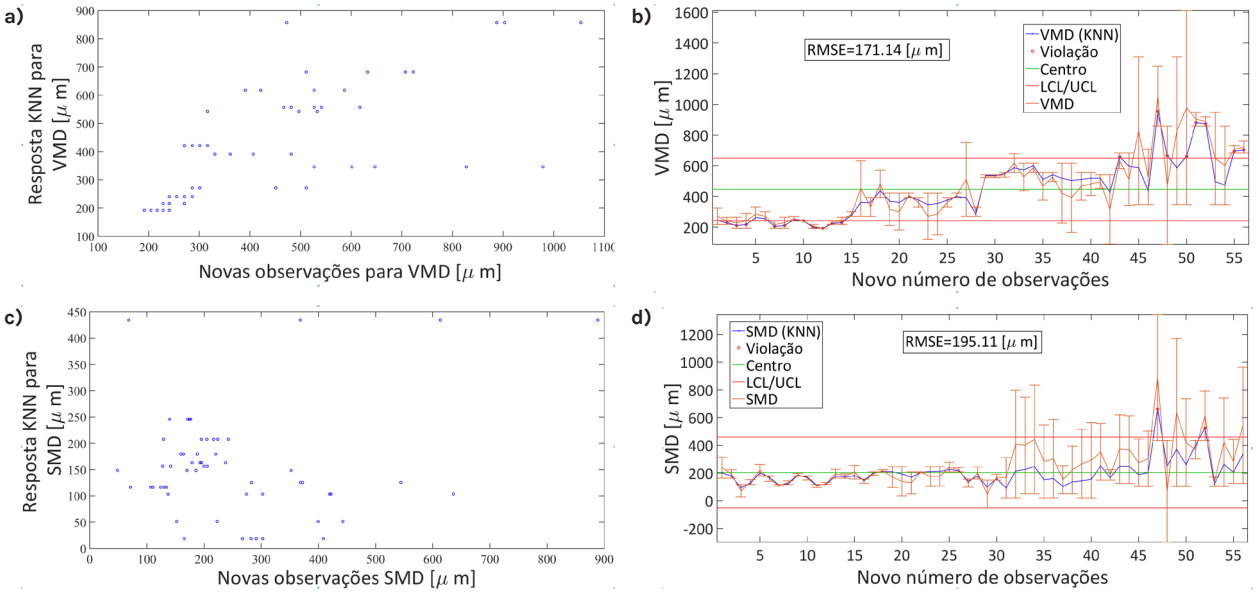


Figura 6. Resultados de avaliação para os soft-sensores e descritores de qualidade DMV e SMD, (a) dispersão para o diâmetro mediano volumétrico (DMV), (b) faixas de controle para o diâmetro mediano volumétrico (DMV), (c) dispersão para o diâmetro mediano de Sauter (SMD), (d) faixas de controle para o diâmetro mediano de Sauter (SMD).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para os ensaios de validação dos soft-sensores se utilizou o SDPA, levando-se em conta a inclusão de um sistema de emulação da velocidade de aplicação como ocorre com pulverizadores comerciais. Adicionalmente, foi considerado um conjunto de medidas utilizando conjuntos de bicos pulverizadores de cone cheio modelos CH06, CH03, CH01 e CH05, da Magnojet® e papéis hidrossensíveis para a coleta de informação sobre os espectros de gotas gerados com o uso de um DropScope® da empresa SprayX®. Essa operação possibilitou a organização de bases de dados sobre espectros de gotas para o auxílio à tomada de decisão sobre ganhos de qualidade na seleção a priori do bico pulverizador e também para ajustes de parâmetros de operação do pulverizador. A Figura 6 ilustra exemplos de resultados da aplicação dos soft-sensores, onde se é possível observar a dispersão para o diâmetro mediano volumétrico (DMV) e do diâmetro mediano de Sauter (SMD) e o estabelecimento de faixas de segurança para o controle dos mesmos.

Resultados decorrentes do uso de controladores PID, GPC e CPC-fuzzy em sistemas pulverizadores podem ser observados nas Figuras 7, 8, 9 e 10, as quais apresentam leituras de vazão Q_f, *duty-cycle* D_v e erro de leitura quando utilizados bicos pulverizadores de cone cheio modelos CH06, CH03, CH01 e CH05, da Magnojet®.

No experimento organizado para a validação dos diferentes controladores quando da aplicação da referência degrau pode-se observar que os controladores GPC e GPC-fuzzy conseguiram atingir em regime um erro inferior à tolerância de 10% que foi pré-estipulada. Já o controlador PID de forma geral apresentou um erro maior, com exceção ao ensaio realizado com o bico pulverizador CH05, onde a referência não levou à saturação da entrada no controle. Para esse caso, apesar do erro observado, quando em regime o controlador PID foi o que apresentou o menor tempo de resposta.

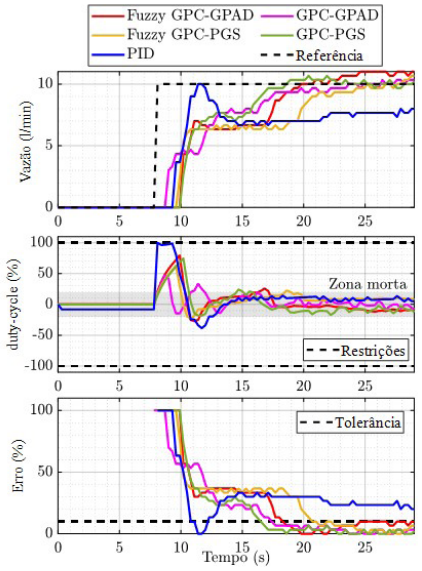


Figura 7. Resposta ao degrau dos controladores embarcados com o bico pulverizador CH06.

Por outro lado, a inclusão da lógica fuzzy junto ao controlador GPC utilizando o algoritmo PGSM levou

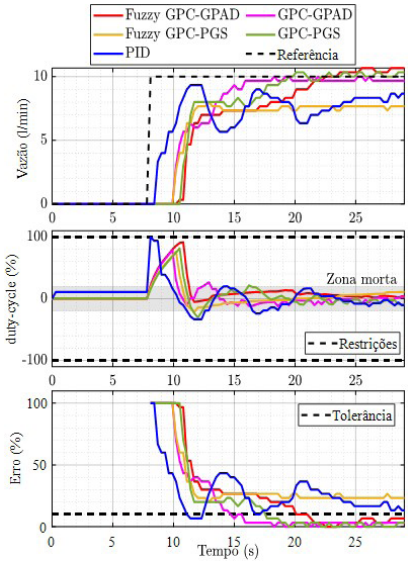


Figura 8. Resposta ao degrau dos controladores embarcados com o bico pulverizador CH03.

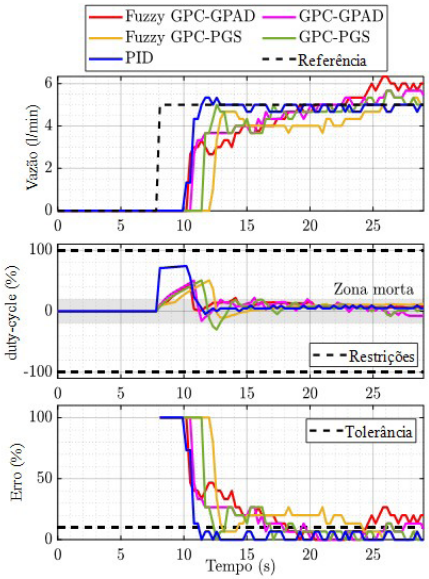


Figura 10. Resposta ao degrau dos controladores embarcados com o bico pulverizador CH05.

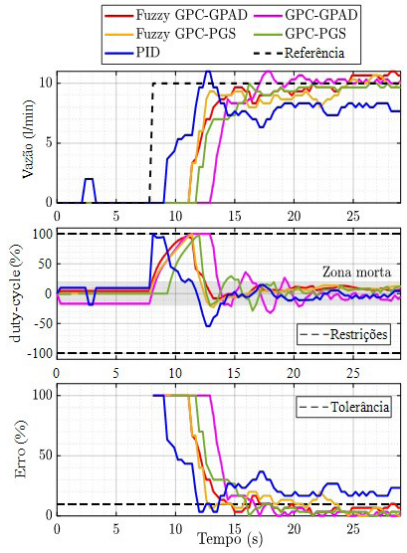


Figura 9. Resposta ao degrau dos controladores embarcados com o bico pulverizador CH01.

a um tempo de acomodação mais longo quando comparado ao uso do controlador GPC convencional operando com o mesmo algoritmo. Tal resultado pode ter sido causado devido ao uso de parametrização da lógica fuzzy, tendo sido organizado utilizando MatLab® e o modelo GPAD, o que justificaria o controlador GPC-fuzzy (GPAD) apresentar um tempo de acomodação mais curto, sendo, portanto, superior aos demais controladores avaliados.

Analisando as curvas do sinal do ciclo de trabalho dos controladores é também possível observar os efeitos da zona morta no sinal de controle, o que poderia ter levado a erros de regime e oscilações, como é o caso do GPC (GPAD) entre 14s e 20s e do GPC (PGSM) entre 11s e 20s (Figura 9), porém esses efeitos foram atenuados quando da incorporação da lógica fuzzy.

É ainda possível observar nos resultados, quando avaliado considerando a resposta à aplicação de um sinal degrau, que a ocorrência de atraso pode ser minimizada com o uso de estratégias de antecipação de referências, o que pode resultar em melhoras na resposta e diminuição do erro de aplicação. Tal aspecto pode ser parte do desenvolvimento de um pulverizador, uma vez que mapas de prescrição de agrotóxicos podem ser formulados ou definidos em tempo real com o uso de sistemas de visão computacional, auxiliando na definição prévia das referências requeridas para o ajuste de antecipações operacionais.

Na etapa de validação dos controladores PID, GPC e GPC-fuzzy foi utilizado o software MatLab®, no qual estes foram sintonizados via simulação, para em seguida serem embarcados no STM32F407-Discovery utilizando a linguagem C+, considerando como variável de controle a vazão da calda de pulverização.

Para garantir a segurança na operação do sistema hidráulico do SPDS foi evitada a ocorrência de picos de pressão superiores a 10 bar na barra, sendo necessário ajustar o valor das referências quando utilizam as pontas modelos CH05 e CH01. O sistema fuzzy foi embarcado junto ao controlador GPC, para isso foi adotada uma estratégia de discretização da superfície que relaciona as entradas e saídas do sistema fuzzy, possibilitando a representação dessa superfície por uma matriz de 300 pontos. Os ensaios utilizaram duas barras com sete pontas de pulverização cada, espaçados por 50 cm. A velocidade de trabalho é

de 10 km/h e vazão constante em 40 l/min na bomba hidráulica de pulverização.

Em termos de erro de aplicação, outro aspecto a ser considerado na utilização de pulverizadores de barra com pontas convencionais é que a vazão da calda a ser aplicada se distribui igualmente entre os bicos de pulverização. Assim, é possível definir controladores de pulverização que venham a apresentar erros de aplicação inferiores a 5%. Entretanto, outro problema que pode ocorrer no processo de aplicação de agrotóxicos é o erro de aplicação decorrente das trajetórias desenvolvidas pela máquina agrícola pulverizadora. Em trajetórias curvilíneas, é possível limitar o erro de aplicação dentro de valores aceitáveis baseado na modelagem da mecânica do esterçamento da máquina agrícola. Um exemplo disso foi apresentado em Penaloza (2014), considerando um trator John Deere modelo 6110J e um pulverizador tratorizado tipo barra-carreta da empresa Jacto modelo Advance-3000-AM24® operando com manobras curvilíneas e realizando esterçamento das rodas dianteiras, conforme ilustrado na Figura 11. Nesse exemplo, foi possível observar a ocorrência de variações da vazão nos bicos pulverizadores que estão dispostos na barra em virtude da variação da velocidade angular ao longo da barra de pulverização.

O erro de aplicação neste caso é dado em função da diferença de velocidade entre os bicos pulverizadores, as quais são relativas ao raio de curva no centro do veículo pulverizador, onde é medida a velocidade para cálculo da vazão de aplicação. Assim, a velocidade de cada bico pulverizador é dada em função da velocidade angular, ou seja, $v_p=\omega R_p$, sendo a velocidade angular do pulverizador medida em [rad/s] e R_p é a posição do bico pulverizador com relação ao centro do raio da curva R, dado em [m].

Da Figura 11, definindo $s = r - z$, obtém-se a posição do pulverizador em função da posição do trator e a velocidade dos bicos pulverizadores em função da velocidade do trator, na forma:

$$\begin{bmatrix} x_p(t) & y_p(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t) - L\cos(\theta_1) & y(t) - L\,sen(\theta_1) \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p & \dot{y}_p & \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} + L\,\dot{\theta}_1\,sen(\theta_1) & \dot{y} + L\,\dot{\theta}_1\,coscos(\theta_1) & \omega \end{bmatrix} \quad (13)$$

em que
L é o cumprimento do pulverizador.

Com esse modelo cinemático do pulverizador, passou a ser possível calcular a velocidade do pulverizador e as velocidades de cada bico pulverizador. Pode ser observado que o modelo cinemático leva em conta o centro de rotação e o centro de massa do trator, assim como as dimensões e as distâncias do ponto de acoplamento com respeito ao trator e ao pulverizador. Para se encontrar a taxa que é aplicada para cada bico pulverizador são usadas as equações que definem a posição e orientação do trator e do pulverizador, ou seja, (12) e (13), bem como o modelo que representa a razão de fluxo da calda.

Adicionalmente, através do raio de curva do conjunto trator-pulverizador pode-se agora calcular o ângulo médio de esterçamento das rodas interna e externa do trator para avaliar o erro de aplicação em função do ângulo de esterçamento das rodas, o qual pode ser dado por:

$$\delta(t) = \left(\frac{\sqrt{R(t)^2 - a_2^2}}{(a_2 + a_1)} \right) \quad (14)$$

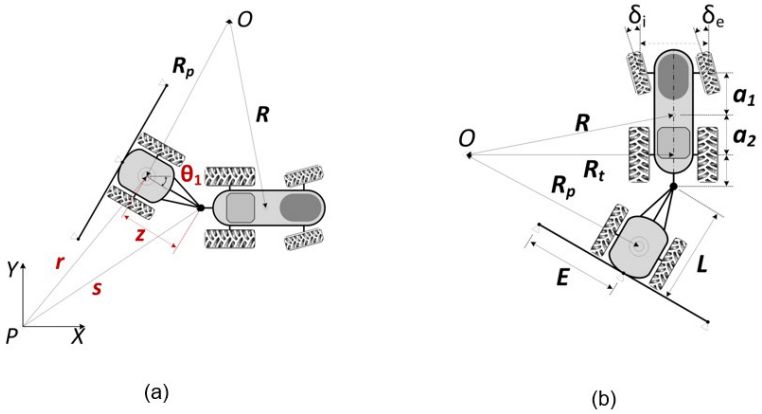


Figura 11. (a) cinemática do conjunto trator-pulverizador, (b) detalhe das variáveis do modelo do esterçamento para curvas.

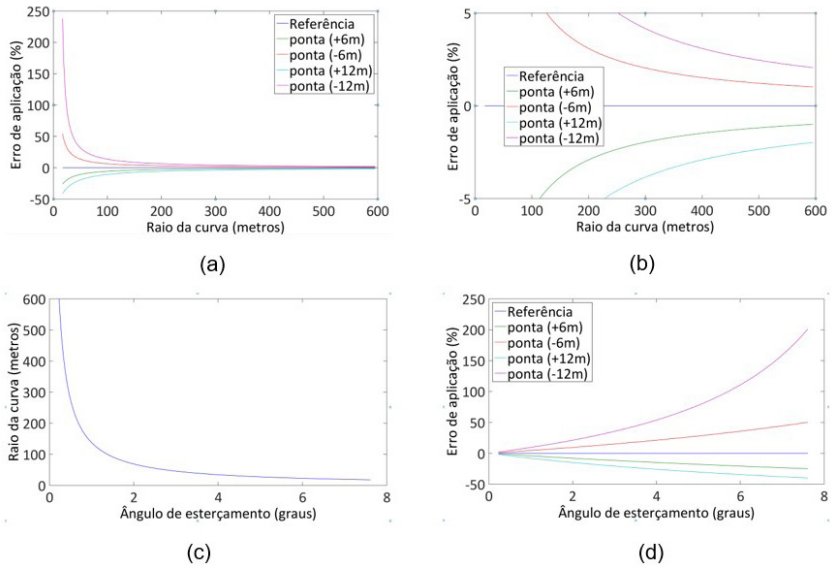


Figura 12. Em (a) observa-se o erro de aplicação em função do raio, em (b) observam-se detalhes onde o erro é inferior a ±5%, em (c) observa-se a variação do raio de curvatura versus o ângulo de esterçamento, (d) os erros da aplicação em função do ângulo de esterçamento.

em que
$R(t)$ é o rádio de curvatura do trator, a_1 e a_2 são constantes que determinam a distância entre o centro de massa e o eixo das rodas dianteiras e traseiras respectivamente.

Para validar o modelo cinemático é usada a distância entre os vetores de posição do conjunto trator-pulverizador. Seja b a distância euclidiana entre os vetores r e s. Calculando b para todos os valores de posição do trator e pulverizador para certa velocidade, deve-se encontrar como resultado um valor constante igual à magnitude do vetor $|z| = L$. Este resultado é consistente com a diferença $z = r - s$ que foi o ponto de partida da modelagem da cinemática do conjunto trator-pulverizador.

Na Figura 12, é apresentada graficamente a relação do erro de aplicação em função do raio de curva para bicos pulverizadores nas posições de ±6m e ±12m, o valor de referência, a posição 0,0 m com relação ao centro do pulverizador, bem como os erros que ocorrem na aplicação da calda em função do ângulo de esterçamento. Também é possível verificar o valor do raio de curva (~250m), onde o erro de aplicação é inferior a ±5%, no pior caso (posição igual a -12m). Da mesma forma, é também possível observar graficamente o comportamento da relação ângulo de esterçamento versus raio da curvatura, onde quando ocorre diminuição do ângulo de esterçamento ocorre aumento do raio de curvatura, aproximando-se de um comportamento linear. Também são apresentadas variações no erro de aplicação em função do ângulo de esterçamento para bicos pulverizadores nas posições ±6m e ±12m e o valor de referência. Em valores absolutos, o erro de aplicação aumenta quando ocorre o aumento do ângulo de esterçamento.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram discutidos e comparados resultados experimentais obtidos com a aplicação de soft-sensores, controladores embarcados PID, GPC e fuzzy-GPC para o controle de vazão de pulverizadores agrícolas, bem como considerações sobre o erro de aplicação decorrente das trajetórias e velocidades empregadas durante um processo de aplicação em área de cultura.

O uso dos soft-sensores ofereceu a possibilidade de inferir a priori de uma operação os valores estimados para se agregar qualidade na aplicação tomando por base o espectro de gota e a definição sobre os bicos pulverizadores a serem utilizados. De fato, o uso de uma base de conhecimento possibilita ganhos na tomada de decisão sobre o ajuste dos parâmetros operacionais a serem empregados no momento de uma aplicação.

Para os controladores embarcados avaliados, conclusivamente foi possível verificar que o uso dos controladores preditivos (GPC e fuzzy-GPC) ofereceu vantagens operacionais para sistemas pulverizadores que apresentam não linearidades em relação à vazão e seu comportamento no tempo utilizado para as aplicações, bem como em relação a dinâmicas no transporte da calda e do tempo morto relacionado às variações da pressão e da vazão na barra onde

se encontram os bicos pulverizadores. A utilização de controladores baseados na abordagem fuzzy como ferramenta de inclusão de não linearidade na estratégia do controlador GPC se destaca como uma inovação. A adição de uma componente adaptativa a partir da inclusão da lógica fuzzy ao GPC se mostrou conclusivamente capaz de diminuir a variação excessiva na ação de controle, o que acarreta aumento da vida útil da válvula proporcional, sem afetar a incorporação das restrições, o que é também uma das principais vantagens da aplicação de um controlador GPC embarcado para sistemas pulverizadores terrestres.

Adicionalmente, o emprego das informações sobre a trajetória e a velocidade do maquinário de pulverização em associação às informações cinemáticas do arranjo trator-pulverizador viabilizaram o estabelecimento de um modelo de correção da aplicação, o que agrega valor e viabiliza minimizar erros de aplicação, seja ela na forma convencional ou mesmo quando se utiliza a aplicação em taxa variada. Os resultados confirmam a viabilidade da integração dessas técnicas para ganhos de robustez e eficácia de sistemas pulverizadores, assim como de potencial ganho na qualidade e eficiência nas aplicações dos agrotóxicos para o combate às pragas agrícolas.

Para trabalhos futuros são considerados integrar e embarcar os métodos ora validados diretamente junto aos bicos pulverizadores, de forma a se buscar estabelecer conceitualmente bicos pulverizadores inteligentes que operem de forma não supervisionada na tomada de decisão em tempo real para o controle de vazão em taxa variada durante processos de combate às pragas agrícolas em área de cultura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) pelo fomento via projeto "Desenvolvimento de Modelos, Ferramentas e Instrumentos Automatizados Avançados para a Pulverização Agrícola de Precisão" (SEG 01.14.09.001.05.00.05) e apoio da Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade de São Paulo (USP), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, sob a bolsa 88887.703189/2022-00), e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp, sob a bolsa 2023/06759-0), assim como à Magnojet pelo fornecimento dos bicos pulverizadores para os experimentos laboratoriais e de campo.

REFERÊNCIAS

ANTUNIASSI, U. **Avaliação de sistemas de injeção de defensivos para utilização em agricultura de precisão**. 1999. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP).

BENNUR, J. P.; TAYLOR, R. P. Evaluating the response time of a rate controller used with a sensor-based, variable rate application system. **Applied Engineering in Agriculture**, v. *26*, n. 6, p. 1069-1075, 2010. DOI: http://doi.org/10.13031/2013.35903.

BONADIO, J. A. B.; NETO, R. A.; COSTA, N. V.; RAMELLA, J. R. P. *Tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas: inovações*. In: KUHN, O. J.; NUNES, R. V.; STANGARLIN, J. R.; RAMPIM, L.; FEY, R.; COSTA, N. V.; COSTA, P. B.; GUIMARÃES, V. F.; ZAMBOM, M. A. (orgs.). **Ciências Agrárias**: tecnologias e perspectivas. Marechal Cândido Rondon: Unioeste, 2015. p. 207-225

CHAIM, A. **Manual de tecnologia de aplicação de agrotóxicos**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2009. 73 p.

CHRISTOFOLETTI, J. C. **Considerações sobre a deriva nas pulverizações agrícolas e seu controle**. São Paulo: Teejet South América, 1999. 15 p.

CLARKE, D. W.; MOHTADI, C.; TUFFS, P. S. Generalized predictive control – Part I: the basic algorithm. **Automatica**, v. *23*, n. 1, p. 137-148, 1987. DOI: http://doi.org/10.1016/0005-1098(87)90087-2.

CLARKE, A. **Analysis:** Is direct injection spraying technology about to take off? Future Farming, 2018. Disponível em: https://www.futurefarming.com/tech-in-focus/analysis-is-direct-injection-spraying-technology-about-to-take-off/. Acesso em: 5 de out. de 2022.

CRUVINEL, P. E.; OLIVEIRA, V. A.; MERCALDI, H. V.; PEÑALOZA, E. A. G.; FELIZARDO, K. R. An advanced sensors-based platform for the development of agricultural sprayers. In: YURISH, S.Y. (ed.). **Advances in Sensors**: reviews. Barcelona: International Frequency Sensor Association (IFSA), v. 4, p. 181-204, 2016.

CRUVINEL, P. E.; MERCADI, H. V.; ANDRADE, P. B.; PENALOZA, E. A. G. *Real-time evaluation of failure and reliability in agricultural sprayers using embedded sensors and controller area bus protocol.* **International Journal on Advances in Systems and Measurements**, *v. 13*, p. 161-174, 2020.

CUNHA, J. P. A. R.; CARVALHO, W. P. A. Distribuição volumétrica de aplicações aéreas de agrotóxicos utilizando adjuvantes. **Engenharia na Agricultura**, v. 13, n. 2, p.130-135, 2005.

DORNELLES, M. E.; SCHLOSSER, J. F.; CASALI, A. L.; BRONDANI, L. B. Inspeção técnica de pulverizadores agrícolas: histórico e importância. **Ciência Rural**, v. *39*, n. 5, p. 1601-1606, 2009. DOI: http://doi.org/10.1590/S0103-84782009005000133.

FELIZARDO, K. R. **Modelagem e controle preditivo de um sistema de pulverização com injeção direta**. 2013. 141 f. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia

de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade de São Paulo, 2013. DOI: http://doi.org/10.11606/T.18.2013.tde-30092013-134645.

FELIZARDO, K. R.; MERCALDI, H. V.; OLIVEIRA, V. A.; CRUVINEL, P. E.; STEWARD, B. L. Modeling and model validation of a chemical injection sprayer system. **Applied Engineering in Agriculture**, v. *32*, n. 3, p. 285-297, 2016. DOI: http://doi.org/10.13031/aea.32.10606.

GONZALEZ, R.; PAWLOWSKI, A.; RODRIGUEZ, C.; GUZMAN, J. L.; SANCHEZ-HERMOSILLA, J. Design and implementation of an automatic pressure-control system for a mobile sprayer for greenhouse applications. Spanish. **Journal of Agricultural Research**, v. *10*, n. 4, p. 939-949, 2012.

JAZAR, R. N. **Vehicle dynamics***: theory and application. Riverdale*: Springer, 2008. 1015 p.. DOI: http://doi.org/10.1007/978-0-387-74244-1.

LEADBEATER, A. Recent developments and challenges in chemical disease control - a review. **Plant Protection Science**, v. *51*, n. 4, p. 163-169, 2015. DOI: http://doi.org/10.17221/83/2015-PPS.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in Linguistic Synthesis with fuzzy logic controller. **International Journal of Man-Machine Studies**, v. *7*, n. 1, p. 1-13, 1975. DOI: http://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2.

MAPA. AGROFIT. **Sistemas de agrotóxicos fitossanitários**. Disponível em: https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acesso em: 30 set. 2022.

MATTHEWS, G. A. **Pesticide application methods**. *2.* ed. London: Longman, 1992. 405 p.

MERCALDI, H. V. **Automação de um sistema de pulverização para aplicação de agroquímicos a taxa variada usando injeção direta**. 2012. 127 f. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade de São Paulo. DOI: http://doi.org/10.11606/D.18.2012.tde-23012013-143643.

MERCALDI, H. V.; PENALOZA, E. A.; OLIVEIRA, V. A.; CRUVINEL, P. E. Controlador preditivo com restrições embarcado. **Anais da Sociedade Brasileira de Automática**, v. *1*, n. 1, p. 429-435, 2019.

NATIONAL INSTRUMENTS. **The LabVIEW RIO Architecture**: A Foundation for Innovation. National Instruments, 2024. Disponível em https://www.ni.com/pt-br/innovations/whitepapers/13/the-labview-rio-architecture--a-foundation-for-innovation.html. Acesso em: 5 out. 2022.

OLIVEIRA, V.; AGUIAR, M. *VARGAS, J.* **Engenharia de Controle**: fundamentos e aulas de laboratório. São Paulo: Elsevier Brasil, 2017. 328 p.

PAWLOWSKI, A.; GUZMÁN, J.; SÁNCHEZ-HERMOSILLA, J.; RODRÍGUEZ, C.; DORMIDO, S. A low-cost embedded controller design for selective spraying vehicle. **IFAC-PapersOnLine**, v. *50*, n. 1, p. 5404-5409, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1074.

PECCIN, V. B.; LIMA, D. M.; FLESCH, R. C. C.; NORMEY-RICO, J. E. Fast generalized predictive control based on accelerated dual gradient projection method. **IFAC-PapersOnLine**, v. *52*, n. 1, p. 480-485, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.06.108.

PEÑALOZA, E. A. G. *Modelo do erro de taxa de aplicação em função do ângulo de esterçamento de um pulverizador tratorizado.* In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 2014, São Carlos. **Anais [...]**. São Carlos: SIAGRO, 2014. p. 53-56.

PEÑALOZA, E. A. G.; OLIVEIRA, V. A.; CRUVINEL, P. E. Using soft sensors as a basis of na innovative architecture for operation planning and quality evaluation in agricultural sprayers. **Sensors**, v. *21*, n. 4, p. 1269, 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/s21041269.

PEÑALOZA, E. G.; CRUVINEL, P. E.; OLIVEIRA, V. A.; COSTA, A. G. F. A model approach to infer the quality in agricultural sprayers supported by knowledge bases and experimental measurements. **International Journal of Semantic Computing**, v. *11*, n. 03, p. 279-292, 2017. DOI: http://doi.org/10.1142/S1793351X17400104.

PEREIRA, F. J. S. **Sistemas de comutação de pontas na barra de pulverização para ajuste do tamanho de gotas às condições climáticas e aplicação em taxas variáveis**. 2006. 125 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP).

POWLES, S. B. Evolved glifosato-resistant weeds around the world: lessons to be learnt. **Pest Management Science**, v. *64*, n. 4, p. 360-365, 2008. DOI: http://doi.org/10.1002/ps.1525.

SCHUTZ, D. R. **Controle preditivo embarcado em um sistema de pulverização agrícola para aplicação em taxa variada**. 2022. 117 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade de São Paulo.

SCHUTZ, D. R.; MERCALDI, H. V.; PENALOZA, E. A.; OLIVEIRA, V. A.; CRUVINEL, P. E. An intelligent fuzzy-GPC control for agricultural sprayers: comparison between GPC and PID fuzzy controllers. In: APCA INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATIC CONTROL AND SOFT COMPUTING. 2022, Caparica. **Anais [...]**. Amsterdã: Springer, 2022. p. 272-284. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-031-10047-5_24.

ROSSITER, J. A. **Model-based predictive control:** a practical approach. 1. ed. Washington, D.C.: CRC Press, 2003.

SCHUTZ, D. R.; OLIVEIRA, V. A.; MERCALDI, H. V.; PENÃLOZA, E. A.; CRUVINEL, P. E. Controlador preditivo para uso em pulverizadores agrícolas com simulador operando em hardware-in-the-loop. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE (SBAI). 2021, Rio Grande. **Anais [...]**. Rio Grande: SBA, 2021.

SENAR. **Mecanização***: operação de pulverizador de barras tratorizado.* Brasília: Serviço Nacional de Aprendizagem Rural, 2018. 190 p.

SHIRATSUCHI, L. S.; FONTES, J. R. A. **Tecnologia de aplicação de herbicidas**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. 129 p.

STEWARD, B. L.; HUMBURG, D. S. Modeling the raven scs-700 chemical injection system with carrier control with sprayer simulation. **Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers**, v. *43*, n. 2, p. 231-245, 2000. DOI: http://doi.org/10.13031/2013.2698.

SUTHERLAND, J. A.; KING, W. J.; DOBSON, H. M.; INGRAM, W. R.; ATTIQUE, M. R.; SANJRANI, W. Effect of application volume and method on spray operator contamination by insecticide during cotton spraying. **Crop Protection**, v. *9*, n. 5, p. 343-350, 1990. DOI: http://doi.org/10.1016/0261-2194(90)90004-Q.

SUZUMURA, Y.; CRUVINEL, P. E. Analysis of the quality of the efficiency of agricultural spraying with image processing and neural networks. **Sinergia**, v. *6*, p. 129-137, 2005.

THISTLE, H. W.; TESKE, M. E.; REARDON, R. C. Weather effects on drift meteorological factors and spray drift: An overview. In: NORTH AMERICAN CONFERENCE ON PESTICIDE SPRAY DRIFT MANAGEMENT. 1998, Portland. **Procceedings [...]**. Maine: University of Maine Cooperative Extension, United States Department of Agriculture (USDA), p. 64-74, 1998.

VONDRICKA, J.; LAMMERS, P. S. Real-time controlled direct injection system for precision farming. **Precision Agriculture**, v. 10, n. 5, p. 421-430, 2009.

YASIN, M. Air assisted sleeve boom sprayer. **Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America**, v. *43*, p. 61-66, 2012.

Detecção de frutos por imagem com redes neurais convolutivas: um tutorial

10

Image-based fruit detection using convolutional neural networks: a tutorial

Thiago Teixeira Santos[1]

[1] *Pesquisador, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, thiago.santos@embrapa.br*

RESUMO

Na agricultura digital, a detecção de frutos por imagem é uma forma automática e não destrutiva para monitoramento de culturas. Ao se realizar uma varredura por imagem dos pomares, é possível caracterizar sua variabilidade espacial, fornecendo dados para uma gestão agrícola adequada segundo os preceitos da agricultura de precisão. Nos últimos anos, as redes neurais se estabeleceram como uma técnica eficaz para uso em campo, ambiente não controlado no qual aplicações de visão artificial eram impraticáveis. Neste breve tutorial, abordamos os principais passos envolvidos no treinamento de redes neurais artificiais para detecção de frutos, com exemplos em pomicultura e viticultura com código disponível, facilmente extensíveis a outras culturas.

Palavras-chave: agricultura de precisão; agricultura digital; rede; Embrapa; Brasil.

ABSTRACT

In the realm of digital agriculture, fruit detection by image analysis has emerged as an automated and non-destructive approach to crop monitoring. The use of image scanning techniques in orchards, allows the characterization of spatial variability, providing valuable data for implementing appropriate agricultural management practices aligned with the principles of precision agriculture. Recently, neural networks have established themselves as an effective technique for field applications, where uncontrolled environments previously rendered traditional computer vision applications impractical. This concise tutorial delves into the key steps involved in training artificial neural networks for fruit detection, providing illustrative examples in apple production and viticulture accompanied by readily accessible code, which can be easily extended to other crops.

Keywords: precision agriculture; digital agriculture; network; Embrapa; Brazil.

1 INTRODUÇÃO

A detecção de frutos e espigas em imagens é um componente importante em diversas aplicações agrícolas, como previsão de safra (Nuske et al., 2014; Olenskyj et al., 2022), melhoramento genético de cultivares (Jiang; Li, 2020) e colheita automatizada (Silwal et al., 2017; Williams et al., 2020). Com o advento de sistemas de aprendizado de máquina baseados em *redes neurais convolutivas*, capazes de realizar detecção de objetos em imagens naturais de forma acurada, a detecção de frutos e outras estruturas de plantas em campo se tornou viável e largamente acessível (Figura 1). Proposta em 2015 como uma das primeiras redes neurais capazes de detectar objetos com alta precisão, a arquitetura Faster R-CNN (Ren et al., 2015) foi rapidamente adotada na detecção de frutos, em 2016 (Sa et al., 2016; Stein et al., 2016), para pimentões, melões, morangos e mangas. O mesmo ocorreu com a arquitetura YOLO e suas variações (Redmon; Farhadi, 2017), largamente empregada na detecção de frutos como maçãs (Tian et al., 2019), laranjas (Mirhaji et al., 2021) e uvas (Santos et al., 2020). Diversas outras arquiteturas vêm sendo empregadas na detecção de frutos na agricultura ao longo dos anos, apesar de uma aparente hegemonia das arquiteturas Faster R-CNN, YOLO (e derivados) e Mask R-CNN (He et al., 2017).

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000091

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

Outrora restritas a grupos de pesquisa especializados em visão computacional, atualmente as redes neurais convolutivas são de fácil utilização, tanto em seu treinamento (sua adaptação ao objeto de interesse pretendido) como em sua implantação, mesmo em sistemas embarcáveis. Arquiteturas para detecção de objetos encontram-se disponíveis em bibliotecas de software para redes neurais como Keras, PyTorch e MXNet e também em bibliotecas especializadas em visão computacional como OpenCV, OpenMMLab e GluonCV[1]. Porém, mesmo com seu uso facilitado em bibliotecas modernas, alguns princípios devem ser bem entendidos pelo público interessado em aplicar tais ferramentas.

Este tutorial se destina a pesquisadores, estudantes, fabricantes de máquinas e desenvolvedores em *Agtechs* interessados em ferramentas baseadas em imagem capazes de detectar frutos, espigas, flores, folhas ou outras estruturas de interesse em campo, casas de vegetação, estufas ou laboratórios, caracterizando assim a variabilidade espacial encontrada na cultura. Exemplos de código e documentação que acompanham este tutorial estão disponíveis em um repositório público[2] e devem ser acompanhados conjuntamente a este texto. Duas bases de dados públicas para detecção de frutos serão utilizadas neste tutorial, a WGISD (Santos et al., 2020), produzida para a viticultura na Embrapa, e a MinneApple (Häni et al., 2020), produzida para a pomicultura na Universidade de Minnesota, EUA. Os exemplos no tutorial empregam a MMDetection[3], biblioteca para detecção de objetos implementada em PyTorch. Na data de redação deste tutorial (setembro de 2022), a MMDetection apresentava implementações para as principais arquiteturas neurais em detecção de objetos. Seu uso se baseia em *arquivos de configuração* que definem a origem dos dados, a arquitetura utilizada e o processo de treinamento, bem como todos os parâmetros envolvidos. Trata-se de uma metodologia organizada para gerir o fluxo de trabalho necessário ao desenvolvimento de *modelos* baseados em redes neurais para detecção.

Este tutorial *não* visa ser uma introdução ao *deep learning* (aprendizado de representações por redes neurais), sobretudo devido às limitações de espaço. Os leitores interessados em uma introdução ao *deep learning* com a devida apresentação de seus fundamentos, mas ainda com foco em exemplos práticos de código, podem encontrar em Chollet (2021) um material mais adequado. Já os leitores interessados em uma introdução teórica e matemática detalhada poderão encontrá-la em Bengio et al. (2017).

2 VISÃO GERAL DO FLUXO DE TRABALHO

O método empregado neste tutorial pertence à área do *aprendizado de máquina supervisionado*. No aprendizado de máquina, ao invés de desenvolvermos um programa explicitamente codificado para uma determinada tarefa, desenvolvemos um *modelo*. Tal modelo é um programa indiretamente desenvolvido por um processo de *treinamento*, no qual são apresentados os dados de entrada e os resultados esperados. Um algoritmo de treinamento é empregado para ajustar o modelo, aproximando os resultados produzidos dos resultados esperados. Os resultados produzidos pelo modelo são chamados usualmente de *predições*, enquanto que os resultados esperados são chamados de *ground-truth*[4]. O aprendizado é dito *supervisionado* pela disponibilidade do *ground-truth*, utilizado no ajuste do modelo.

Os modelos apresentam certa estrutura que, na maioria dos sistemas de aprendizado, não se altera nem no treinamento, nem na implantação. No caso de redes neurais, a estrutura é chamada de *arquitetura* e define como vários módulos de processamento transmitem dados de uns para os outros. Esses módulos possuem *parâmetros* que são ajustados durante o processo de treinamento, buscando aproximar as predições do *ground-truth*. O algoritmo empregado no treinamento de redes neurais é chamado de *backpropagation*: ele utiliza o erro entre a predição e o *ground-truth* para, de trás para frente, ir ajustando os parâmetros do modelo, desde os últimos módulos de processamento até os módulos iniciais. O modelo é então uma arquitetura combinada a um conjunto de parâmetros. Uma mesma arquitetura pode, com um certo conjunto de parâmetros, realizar predições da localização de maçãs em pomares e, com um conjunto diferente de parâmetros, produzir predições para a detecção de cachos de uva em imagens de videiras. Conjuntos diferentes de parâmetros podem ser obtidos pelo mesmo processo de treinamento, utilizando conjuntos de dados diferentes: uma base de dados para maçãs ou uma base de dados com cachos de uva (Figura 1).

[1] Keras, keras.io; PyTorch, pytorch.org; MXNet, mxnet.apache.org; OpenCV, opencv.org; OpenMMLab, openmmlab.com; e GluonCV, cv.gluon.ai.

[2] tutfrutdet, github.com/thsant/tutfrutdet.

[3] MMDetection, mmdetection.readthedocs.io.

[4] Embora possa ser traduzido por verdade de campo, o termo ground-truth é mais utilizado na comunidade técnica.

Figura 1. Duas variações do problema de detecção de frutos (aqui, cachos de uva): (i) detecção de frutos (localização dos frutos por caixas delimitadoras retangulares); e (ii) segmentação de instâncias, a variação mais desafiadora, que consiste na detecção e na atribuição dos píxeis pertencentes a cada fruto. Cada cor representa um objeto/instância diferente. Figura adaptada de Santos et al. (2020).

Especialistas em redes neurais vêm propondo diferentes arquiteturas ao longo dos anos, buscando resolver os mais variados problemas em inteligência artificial no geral e em visão computacional em particular. Arquiteturas que têm maior repercussão acabam sendo incorporadas a bibliotecas de software, como a MMDetection. Inovações no processo de treinamento (variações do algoritmo de *backpropagation*) também são incorporadas às bibliotecas. Dessa forma, aqueles que desejam utilizar um detector de objetos em seus problemas específicos não precisam necessariamente desenvolver sua própria arquitetura de redes neurais, mas conduzir um processo de treinamento a partir de um conjunto de dados apropriadamente *anotado*, isto é, dados de entrada acompanhados do *ground-truth* que representa os resultados esperados.

No processo de treinamento, a base de dados, formada pelos dados de entrada (imagens no caso) e pelo *ground-truth* (a localização dos frutos), é fornecida ao processo de treinamento em *lotes* (*batches*). Isto se deve a limitações computacionais: na maior parte dos casos é inviável carregar a base de dados inteira na memória do sistema e obter todas as predições para os parâmetros correntes antes de ajustá-los. O treinamento é então realizado em lotes, com ajustes de parâmetros pelo algoritmo de *backpropagation* ao final do processamento de cada lote. Quando o processo de treinamento finaliza todos os lotes, dizemos que ele completou uma época. Para obter boas predições, o processo de treinamento pode levar dezenas ou centenas de épocas. O progresso do processo é medido pela diminuição do erro, isto é, a diferença acumulada entre as predições e o *ground-truth*. Quanto menor o erro, mais próximas as predições do modelo estão dos resultados esperados.

Arquiteturas modernas de redes neurais apresentam *milhões* de parâmetros. Ajustá-los é um processo computacionalmente custoso, especialmente para processadores de propósito geral como CPUs. Hardware especialmente construído para computação distribuída, como GPUs, conseguem realizar os processos de predição e *backpropagation* de forma mais eficiente. Assim, o treinamento de modelos com redes neurais profundas é realizado utilizando-se esse tipo de processador. Quando um modelo já treinado é utilizado para realizar predições, dizemos que está sendo utilizado para *inferência*. Embora a inferência também seja realizada mais rapidamente em GPUs, dependendo da aplicação o tempo gasto por CPUs em inferência pode ser aceitável, o que aumenta o número de dispositivos nos quais o modelo pode ser disponibilizado. O conteúdo deste tutorial pode ser replicado tanto em CPUs quanto em GPUs, mas recomenda-se fortemente o uso de GPUs, quando possível, no processo de treinamento.

Este tutorial apresentará um fluxo de trabalho completo para detecção de frutos em imagens, incluindo:

criação de uma base de dados anotada – como produzir bases de dados de imagens e anotações para detecção de frutos, que ferramentas podem ser utilizadas na anotação e como essas anotações são armazenadas em arquivos;

carga de lotes – como realizar a leitura da base de dados de modo a produzir os lotes necessários ao treinamento da rede e como utilizar ferramentas de *aumentação* de dados de modo melhorar a generalização da detecção e promover a invariância a condições vistas em situações de campo;

configuração de uma arquitetura de rede neural – como utilizar arquiteturas disponíveis, adaptando-as ao problema de detecção de frutos;

treinamento – como efetuar o treinamento e monitorar seu progresso, além de selecionar e armazenar os melhores parâmetros encontrados para o modelo; e

avaliação e inferência – como avaliar o desempenho do modelo e utilizá-lo na inferência, ou seja, na detecção de frutos em outras imagens.

3 BASE DE DADOS E ANOTAÇÃO

As imagens devem ser obtidas nas condições mais próximas possíveis da condição final de operação. Isso inclui: (i) as cultivares de interesse, por exemplo, *Fuji* e *Gala* na pomicultura ou *Syrah* e *Cabernet Sauvignon* na viticultura; (ii) as condições de iluminação na operação: nublado e ensolarado, manhã e tarde, noite com iluminação artificial; (iii) as características dos sistemas de imageamento: modelos de câmeras, resolução de imagem e a posição da câmera em relação aos frutos. A ideia central é que a base de dados reflita a *diversidade* encontrada no ambiente de operação: bases que apresentam uma *distribuição* similar a da condição de operação produzem modelos superiores.

Quantas imagens são necessárias? Vários frutos podem ser observados em uma única imagem, de forma que cada imagem pode apresentar dezenas de exemplos dos padrões visuais assumidos pelos frutos (Figura 1). Dessa forma, poucas centenas de imagens podem ser suficientes para produzir detectores acurados. Além disso, as técnicas de aumentação que veremos a seguir permitem que mais variabilidade seja disponibilizada ao treinamento para a mesma base de dados, aumentando a diversidade de exemplos fornecidos à rede durante o treinamento. Contudo, o tamanho da base depende da necessidade de exemplificar as diversas situações às quais o sistema será exposto: quanto maior a variabilidade de condições, maior a necessidade de imagens. Como referência, a WGISD apresenta 4.431 cachos de uva em 300 imagens, enquanto que a MinneApple apresenta mais de 40 mil frutos em mil imagens.

Selecionadas as imagens, procede-se para o processo de anotação. Na detecção de objetos, há tradicionalmente dois tipos de anotações empregadas. As *caixas delimitadoras* (*bounding boxes*) são anotações retangulares que se ajustam a cada fruto, como visto na Figura 1 (centro). Para cada fruto, basta o registro das extremidades da caixa retangular, geralmente as coordenadas do canto superior esquerdo e do canto inferior direito do retângulo que melhor se ajusta ao fruto (Figura 2). Esse tipo de anotação, com o uso de ferramenta adequada, é realizado de forma rápida: dezenas de frutos podem ser anotados em poucos minutos. A principal desvantagem é que na área retangular não há o registro de quais píxeis fazem parte do fruto, informação que pode ser de interesse em determinadas aplicações. Já as *máscaras* (Figura 1, à direita), identificam quais píxeis da imagem pertencem aos frutos, mas têm a desvantagem de serem mais demoradas e trabalhosas de serem anotadas. Diversas ferramentas para anotação estão disponíveis, tanto na forma de aplicações *desktop* quanto aplicações *web*. Diversas são disponibilizadas com código aberto, como VIA (VGG Image Anotator), CVAT (Figura 2), Diffgram e LabelImg.[5] Algumas ferramentas (como CVAT e Diffgram, por exemplo) permitem que a tarefa de anotação seja compartilhada por um time de múltiplos anotadores. Há também ferramentas de anotação oferecidas comercialmente, geralmente na forma de aplicações *web*.

Essas ferramentas são capazes de exportar as anotações para diversos formatos de arquivo. No caso da detecção de objetos, um formato[6] popular é o adotado na Common Objects in Context (COCO) (Lin et al., 2014), uma base de dados criada para pesquisa e desenvolvimento em detecção de objetos, composta por mais de 200.000 imagens com objetos em 80 categorias diferentes. Nesse formato, as anotações são representadas na forma de arquivos do tipo JSON, um formato de arquivo textual estruturado largamente utilizado em diversas aplicações. Dada a importância da MSCOCO, a maioria das bibliotecas de software voltadas a redes neurais fornecem utilitários para leitura e carga de dados nesse formato. Outra vantagem é que diversas ferramentas de anotação são capazes de importar dados desse formato, o que pode ser especialmente útil na hora de editar e revisar bases previamente anotadas.

Exemplo: base de dados anotada. No repositório de código, veja wgisd/README.md e minneapple/README.md.

4 AUMENTAÇÕES

A *aumentação* é o processo de produzir mais dados de treinamento artificialmente, aplicando transformações aleatorizadas em imagens existentes na base de treinamento, aproveitando suas anotações. Tais transformações são operações de processamento de imagens que produzem imagens de aparência similar e possíves alterações do objeto em estudo. É importante que tais transformações produzam imagens que sejam plausíveis, similares àquelas que poderiam ser encontradas na operação normal: por exemplo, imagens levemente borradas são similares às produzidas por lentes ligeiramente fora do foco, enquanto imagens clareadas remetem a imagens obtidas em am-

[5] VIA, www.robots.ox.ac.uk/~vgg/software/via; CVAT, www.cvat.ai; Diffgram, diffgram.com; e LabelImg, github.com/heartexlabs/labelImg.

[6] Common Objects in Context, formato cocodataset.org/#format-results.

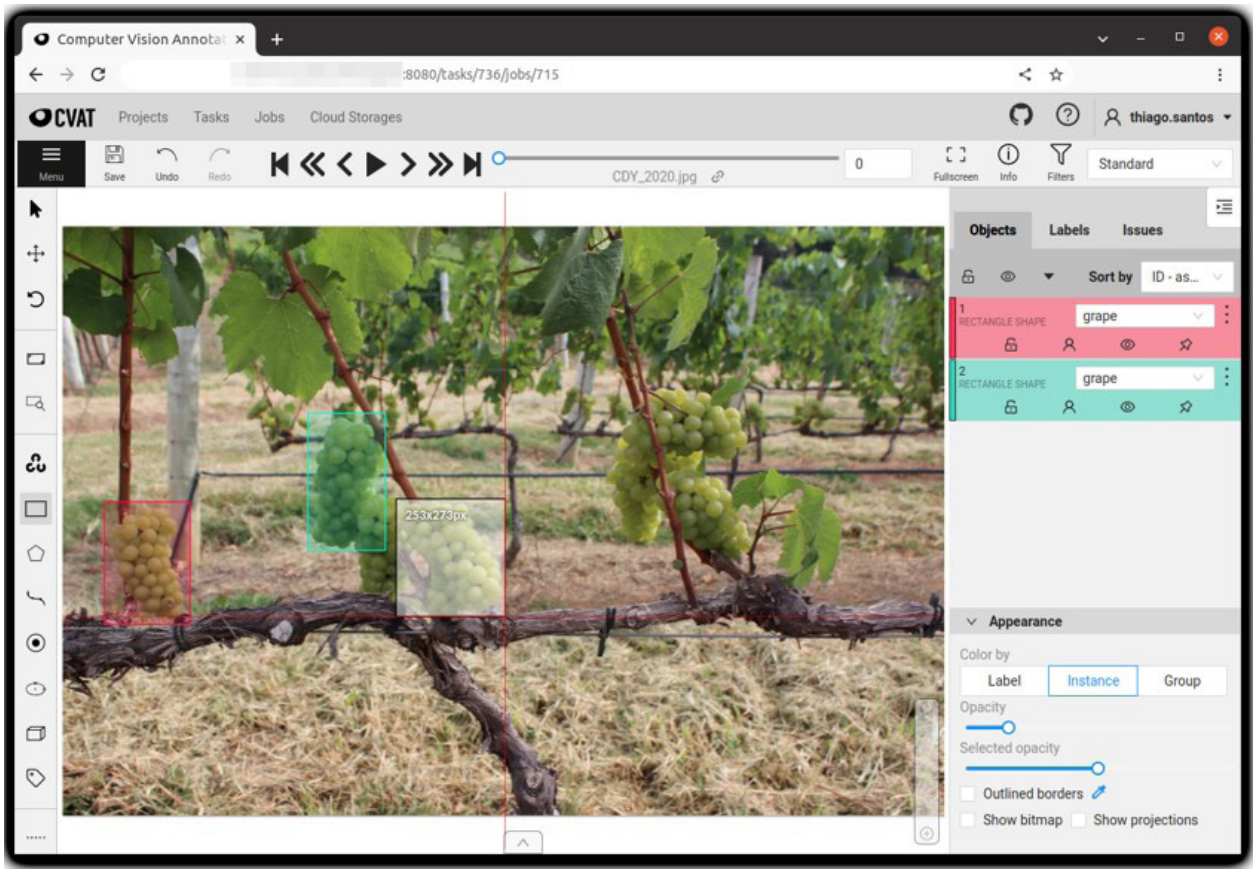


Figura 2. Exemplo de ferramenta de anotação: CVAT. Cachos de uva estão sendo anotados com caixas delimitadoras (*bounding boxes*).

biente mais iluminado ou com maior exposição da câmera. No caso de frutos, transformações podem ser aplicadas para remeter a diferentes condições de iluminação, como diferenças de horário, tempo nublado ou efeitos causados por reflexos solares e umidade. As imagens também podem ser espelhadas horizontalmente. O princípio a ser seguido é o da *invariância a transformações*: se o modelo pode encontrar um fruto na imagem original, ele também deve ser capaz de encontrar o mesmo fruto na imagem transformada. Se maçãs são detectadas em uma imagem, o modelo deve ser capaz de fazer o mesmo em uma versão espelhada da imagem, por exemplo. Existem bibliotecas de software especialmente dedicadas à aumentação, como Albumentations[7] e imgaug[8] – galerias de imagens exibindo exemplos das várias transformações disponíveis encontram-se disponíveis na documentação dessas bibliotecas. Todas as transformações disponíveis na Albumentations podem ser diretamente utilizadas nos pipelines de detecção de objetos da MMDetection.

Exemplo: carga de lotes. No repositório de código, veja wgisd/wgisd.py.

5 ARQUITETURAS

As arquiteturas para detecção de objetos costumam ter três conjuntos de módulos componentes, chamados de *backbone*, *neck* e *head* (espinha dorsal, pescoço e cabeça, em tradução livre). *Backbones*, baseados em redes convolutivas, são essencialmente bancos de filtros que aplicam transformações[9] às imagens de entrada. O primeiro módulo aplica transformações diretamente nos píxeis da imagem, enquanto os módulos seguintes aplicam novos bancos de filtros aos resultados produzidos pelos módulos anteriores. A intuição é que essas transformações combinem informações e ressaltem as características mais importantes para o problema de detecção, por exemplo, salientando elementos que compõem os objetos a serem detectados. As redes convolutivas realizam a composição das características, de forma que os módulos finais estão

[7] Albumentations, albumentations.ai.
[8] Imgaug, imgaug.readthedocs.io.
[9] Não confundir com as transformações realizadas pelo processo de aumentação durante o treinamento das redes.

combinando características mais simples aprendidas nos módulos anteriores. Nos exemplos no repositório, há dois *backbones* em uso: ResNet-50 (He et al., 2016) e EfficientNet-B3 (Tan; Le, 2019).

Enquanto o *backbone* aprende transformações da imagem capazes de construir uma *representação* dela especialmente adaptada para a tarefa em questão (daí o termo *aprendizado de representações*), cabe à *head* receber essa representação da imagem e realizar a tarefa pretendida. No caso da detecção de objetos, uma tarefa é determinar, a partir da representação, quais as caixas delimitadoras para cada fruto. Porém, redes podem ter múltiplas tarefas a resolver, o que significa que podem ser *multi-head*, ou seja, incluir várias *heads* que podem enviar informação umas para as outras. No caso da segmentação de instâncias, outra tarefa é a determinação de uma máscara que identifica quais píxeis dentro da caixa delimitadora pertencem ao fruto, logo encontraremos uma *mask head* na arquitetura. Cada *head* produz uma saída (*output*) que é comparada a anotação por uma função de erro (*loss function*), que avalia numericamente a discrepância entre o predito e o *ground-truth*. Os erros das diversas *heads* são integrados em um valor unificado e o processo de *backpropagation* irá ajustar os parâmetros do modelo de modo a diminuir esse erro total[10].

Ligando o *backbone* e o *head*, é comum encontrarmos um *bottleneck*, ou simplesmente *neck*, um conjunto de módulos dedicados a ajustar a saída do *backbone* (uma arquitetura de propósito geral) à entrada do *head*, geralmente realizando operações de redução de dimensionalidade (como a redução do número de canais). Quando estamos adaptando redes a um problema particular de detecção de objetos (por exemplo, detecção de maçãs), geralmente basta configurar a *head* para que ela se adapte ao problema em questão. No caso da Mask RCNN e da RetinaNet (Lin et al., 2017), empregadas nesse tutorial, a única adaptação necessária é informar o número de classes. Muitas implementações partem da MSCOCO e por isso vêm configuradas para as 80 classes existentes naquela base de dados. No caso dos arquivos de configuração da MMDetect, a alteração é realizada de modo simples, pela edição do número de classes no arquivo de configuração do modelo. Todos as demais configurações do modelo são *herdadas* das *configurações base* da MMDetect.

[10] O erro deve ser uma função diferenciável dos parâmetros, ou seja, deve ser possível determinar um gradiente, a direção na qual os parâmetros devem ser modificados de forma a diminuir o erro. O algoritmo de backpropagation é baseado em um algoritmo de descida de gradiente.

Exemplo: configuração de uma arquitetura de rede neural. No repositório de código, o arquivo wgisd/mask_rcnn_r50_fpn_1x_wgisd.py exibe a configuração de uma rede Mask R-CNN que se utiliza da ResNet 50 como *backbone* e de uma rede FPN como *neck*. Todas a configurações que não foram diretamente especificadas são *herdadas* das configurações base encontradas em mask_rcnn/mask_rcnn_r50_fpn_1x_coco.py, oriunda da implementação original da MMDetection. De forma similar, em wgisd/retinanet_effb3_fpn_crop896_wgisd.py encontramos a configuração para uma rede RetinaNet que utiliza a EfficientDet B3 como *backbone* e novamente a FPN como *neck*. Exemplos similares podem ser encontrados para a MinneApple (maçãs).

6 TREINAMENTO

No treinamento, *ciclos* (*steps*) constituídos pelas etapas de predição, cômputo do erro e ajuste de parâmetros são realizados sucessivamente. Uma amostra de imagens (e suas anotações) é selecionada e aumentações são realizadas, fornecendo variações diferentes da mesma imagem a cada vez que ela é incluída na amostra. Tal amostra forma um lote. O modelo (a arquitetura e os valores atuais dos parâmetros) recebe o lote e realiza predições, no nosso caso, a localização dos frutos. As predições são comparadas ao *ground-truth* e o erro é utilizado no algoritmo de *backpropagation* para ajustar os parâmetros, o que conclui o ciclo.

O treinamento é repetido até atingirmos *convergência*, isto é, um estado no qual o modelo atinge um certo nível de desempenho limite, no qual novos ciclos de treinamento com a mesma base de dados não produzem mais melhorias nas predições. A Figura 3 exibe os valores do erro no conjunto de treinamento e da precisão média no conjunto de validação para uma rotina de treinamento de um modelo Mask R-CNN para a WGISD. Observamos que antes mesmo de atingirmos 10.000 lotes, o erro no conjunto de treinamento decresce lentamente, enquanto a precisão para as imagens de validação atinge um *platô*. Examinando o platô mais atentamente, ele apresenta uma inclinação que sugere que a precisão está *diminuindo* com o passar dos ciclos de treinamento. Isto sinaliza um fenômeno de *superajuste* (*overfitting*), no qual o modelo passa a se ajustar demasiadamente aos dados de treinamento ao custo de seu poder de *generalização*, isto é, sua capacidade de apresentar boas predições em imagens fora do conjunto de treinamento. Informalmente, podemos fazer uma analogia com um estudante que decora questões e apresenta bons resultados em provas, mas exibe um mal desempenho quando questões similares, mas diferentes das decoradas, são apresentadas. Logo, nosso objetivo no treinamento é atingir um ponto de convergência, mas evitar o *overfitting*.

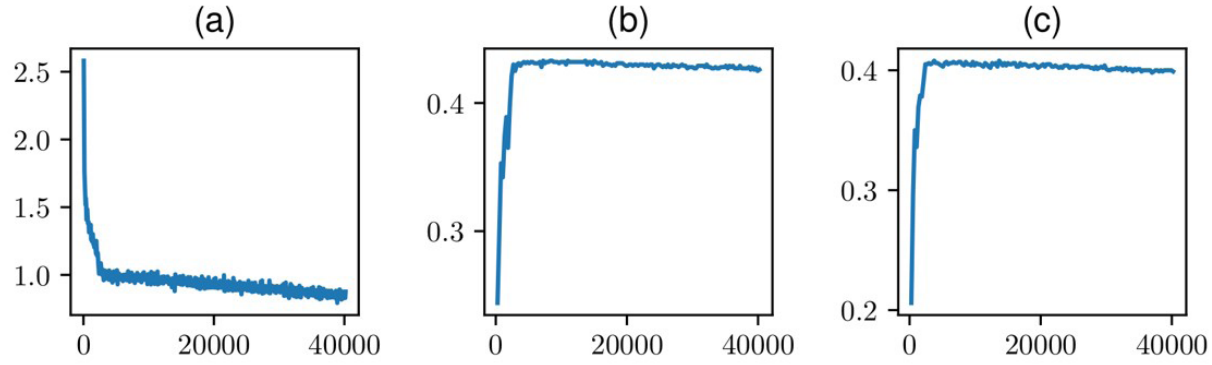


Figura 3. Métricas obtidas durante o treinamento. Em todos os três gráficos, o eixo das abscissas representa o número de lotes processados. (a) erro do treinamento (*training loss*); (b) mAP das caixas delimitadoras para o conjunto de validação; (c) mAP das máscaras para o conjunto de validação.

Gráficos como os vistos na Figura 3 são empregados durante o processo de treinamento para monitorarmos a convergência do modelo e possíveis problemas no processo. Ferramentas como TensorBoard[11] são utilizadas para visualização desses gráficos e outras informações produzidas pelo processo de treinamento.

Exemplo: treinamento. No repositório de código, veja README.md para orientações sobre o processo de treinamento, incluindo seu monitoramento com TensorBoard.

7 PRÉ-TREINAMENTO E TRANSFERÊNCIA DE APRENDIZADO

Como o modelo é capaz de realizar predições para o *primeiro* ciclo de treinamento, em que nenhum ajuste dos parâmetros do modelo foi realizado? Os parâmetros são inicializados aleatoriamente, o que irá inevitavelmente produzir níveis altos de erro nos primeiros ciclos. Conforme os parâmetros são ajustados, o erro diminui e podemos observar frequentemente quedas vertiginosas do erro já nos primeiros ciclos do treinamento.

Porém, há uma maneira mais eficiente de inicializarmos os parâmetros de uma rede, sobretudo os parâmetros do *backbone*, responsável pela extração de características. A *transferência de aprendizado* inicializa o modelo com parâmetros aprendidos em grandes bases de dados de propósito geral (Lin et al., 2014) e disponibilizados publicamente. Essa técnica de inicialização diminui o tempo de treinamento e possibilita que bons níveis de acurácia na detecção de objetos sejam atingidos com o uso de bases de dados de tamanho menor. Os primeiros módulos de um *backbone* aprendem características básicas, comuns à maioria das tarefas visão computacional, como bordas, linhas e formas. Isto permite que um *backbone* treinado em uma base como a MSCOCO produza representações úteis a tarefas de detecção particulares, como detecção de uvas ou maçãs, por exemplo. Nos exemplos disponíveis no repositório, utilizamos *backbones* pré-treinados, carregados automaticamente pela MMDetection.

8 AVALIAÇÃO E INFERÊNCIA

O conceito central na avaliação é que um objeto é considerado detectado se uma porcentagem considerável de sua área foi encontrada pelo detector, conceito expresso por uma métrica chamada de *interseção sobre união* (*intersection over union*, IoU). Outro ponto a ser observado é que a maioria dos detectores de objeto fornece, associado à caixa delimitadora de cada predição, um valor no intervalo de 0 a 1 que indica a *confiança* (*score*) naquela detecção: valores mais próximos de 1 indicam maior confiança de que aquela predição corresponde a um objeto.

Especificados valores mínimos de confiança e IoU, é possível estabelecer os *falsos positivos* (FPs) e os *falsos negativos* (FNs) de uma predição, respectivamente as predições de frutos que não existem no *ground-truth* (FPs) e frutos do *ground-truth* não encontrados pelo detector (FNs). As métricas de avaliação de desempenho de um detector são definidas sobre os valores de FP e FN. Como é possível variar a confiança e o IoU mínimos ou, ainda, estabelecer intervalos de interesse para esses dois valores, a avaliação do desempenho de detectores de objetos acaba apresentando diversos detalhes técnicos que, por limitação de espaço, não serão apresentados neste texto, mas encontram-se detalhados no repositório.

[11] TensorBoard, www.tensorflow.org/tensorboard.

Figura 4. Detecção de maçãs por um modelo Mask R-CNN. (a) imagem de entrada; (b) predições obtidas pelo modelo treinado.

Finalmente, os parâmetros que apresentaram melhor avaliação podem ser armazenados, junto com a arquitetura, formando um modelo para detecção que pode ser utilizado em aplicações que realizarão *inferência*: a detecção de frutos em novas imagens. A Figura 4 exibe um exemplo de inferência para segmentação de instâncias de maçã com um modelo Mask R-CNN.

Exemplo: avaliação e inferência. No repositório de código, veja README.md para orientações sobre as ferramentas de avaliação e inferência disponíveis na MMDetection.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Redes neurais artificiais para detecção de objetos em imagens, particularmente frutos, são capazes de atingir elevados níveis de acurácia, mesmo em condições de campo, onde há enorme diversidade de iluminação, condições de imageamento e variabilidade de fenótipos. O emprego dessas redes não está mais limitado a especialistas em visão computacional: é agora técnica reconhecida na agricultura digital para caracterização de talhões e sua variabilidade espacial. Graças a bibliotecas modernas para visão computacional como MMDetection, técnicos que tenham familiaridade com programação podem produzir modelos baseados em redes neurais para detecção de frutos ou outras estruturas de interesse como flores, folhas e espigas. Na literatura técnico-científica, detectores de frutos baseados em arquiteturas neurais como Faster R-CNN, Mask R-CNN e YOLO, todas disponíveis na MMDetection (e em outras bibliotecas), têm sido empregados com bons níveis de acurácia. O repositório de software que acompanha este tutorial apresenta exemplos práticos na viticultura e na pomicultura, que podem ser adaptados a outras culturas, ou, ainda, a casos particulares delas.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece os auxílios recebidos da Embrapa, pelo projeto 01.14.09.001.05.04, e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), em conjunto com a IBM, pelo auxílio 2017/19282-7.

REFERÊNCIAS

BENGIO, Y.; GOODFELLOW, I.; COURVILLE, A. **Deep learning**. Cambridge: MIT press, 2017. Disponível em: hhttps://www.deeplearningbook.orgi. Acesso em: 22 out. 2023.

CHOLLET, F. **Deep learning with python, second edition**. Shelter Island: Manning, 2021. Disponível em: hhttps://www.manning.com/books/deep-learning-with-python-second-edition. Acesso em: 22 out. 2023.

HE, K.; GKIOXARI, G.; DOLLAR, P.; GIRSHICK, R. Mask R-CNN. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION (ICCV), 2017, Venice. **Procceedings [...]**. Venice: IEEE, 2017. DOI: https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.322.

HE, K.; ZHANG, X.; REN, S.; SUN, J. Deep residual learning for image recognition. In: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION (CVPR). 2016, Las Vegas. **Procceedings [...]**. Las Vegas: IEEE, 2016. p. 770-778. DOI: https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90.

HÄNI, N.; ROY, P.; ISLER, V. MinneApple: a benchmark dataset for apple detection and segmentation. **IEEE Robotics and Automation Letters**, v. 5, n. 2, p. 852-858, 2020. DOI: https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2965061.

JIANG, Y.; LI, C. Convolutional neural networks for image-based high-throughput plant phenotyping: a review. **Plant Phenomics**, v. 2020, p. 4152816, 2020. DOI: https://doi.org/10.34133/2020/4152816.

LIN, T.-Y.; GOYAL, P.; GIRSHICK, R.; HE, K.; DOLLAR, P. Focal loss for dense object detection. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION (ICCV), 2017, Venice. **Procceedings [...]**. Venice: IEEE, 2017. DOI: https://doi.org/10.1109/TPAMI.2018.2858826.

LIN, T.-Y.; MAIRE, M.; BELONGIE, S.; BOURDEV, L.; GIRSHICK, R.; HAYS, J.; PERONA, P.; RAMANAN, D.; ZITNICK, C. L.; DOLLÁR, P. **Microsoft COCO: common objects in context.** arXiv, 2014. Disponível em: https://arxiv.org/abs/1405.0312i. Acesso em: 22 out. 2023.

MIRHAJI, H.; SOLEYMANI, M.; ASAKEREH, A. Fruit detection and load estimation of an orange orchard using the yolo models through simple approaches in different imaging and illumination conditions. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 191, p. 106533, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106533.

NUSKE, S.; WILSHUSEN, K.; ACHAR, S.; YODER, L.; NARASIMHAN, S.; SINGH, S. Automated visual yield estimation in vineyards. **Journal of Field Robotics**, v. 31, n. 5, p. 837-860, 2014. DOI: https://doi.org/10.1002/rob.21541.

OLENSKYJ, A. G.; SAMS, B. S.; FEI, Z.; SINGH, V.; RAJA, P. V.; BORNHORST, G. M.; EARLES, J. M. End-to-end deep learning for directly estimating grape yield from ground-based imagery. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 198, p. 107081, 2022. ISSN 0168-1699. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107081.

REDMON, J.; FARHADI, A. YOLO9000: Better, Faster, Stronger. In: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION (CVPR). 2017, Venice. **Procceedings [...]**. Venice: IEEE, 2017. DOI: https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.690.

REN, S.; HE, K.; GIRSHICK, R.; SUN, J. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks. In: ORTES, C.; LAWRENCE, N.; LEE, D.; SUGIYAMA, M.; GARNETT, R. (eds.). **Advances in neural information processing systems**. Curran Associates, Inc., 2015. Disponível em: https://proceedings.neurips.cc/paper/2015/file/14bfa6bb14875e45bba028a21ed38046-Paper.pdf. Acesso em: 22 out. 2023.

SA, I.; GE, Z.; DAYOUB, F.; UPCROFT, B.; PEREZ, T.; MCCOOL, C. Deepfruits: a fruit detection system using deep neural networks. **Sensors**, v. 16, n. 8, p. 1222, 2016. DOI: https://doi.org/10.3390/s16081222.

SANTOS, T. T.; SOUZA, L. L.; SANTOS, A. A.; AVILA, S. Grape detection, segmentation, and tracking using deep neural networks and three-dimensional association. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 170, p. 105247, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105247.

SILWAL, A.; DAVIDSON, J. R.; KARKEE, M.; MO, C.; ZHANG, Q.; LEWIS, K. Design, integration, and field evaluation of a robotic apple harvester. **Journal of Field Robotics**, v. 34, n. 6, p. 1140-1159, 2017. DOI: https://doi.org/10.1002/rob.21715.

STEIN, M.; BARGOTI, S.; UNDERWOOD, J. Image based mango fruit detection, localisation and yield estimation using multiple view geometry. **Sensors**, v. 16, n. 11, p. 1915, 2016. DOI: https://doi.org/10.3390/s16111915.

TAN, M.; LE, Q. EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In: 36TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE LEARNING, 2019, Long Beach. **Proceedings [...]**. Long Beach: PMLR, 2019. v. 97, p. 6105-6114. Disponível em: https://proceedings.mlr.press/v97/tan19a.html. Acesso em: 22 out. 2023.

TIAN, Y.; YANG, G.; WANG, Z.; WANG, H.; LI, E.; LIANG, Z. Apple detection during different growth stages in orchards using the improved yolo-v3 model. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 157, p. 417-426, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.012.

WILLIAMS, H.; TING, C.; NEJATI, M.; JONES, M. H.; PENHALL, N.; LIM, J. Y.; SEABRIGHT, M.; BELL, J.; AHN, H. S.; SCARF, A.; MACDONALD, B. Improvements to and large-scale evaluation of a robotic kiwifruit harvester. **Journal of Field Robotics**, v. 37, n. 2, p. 187-201, 2020. DOI: https://doi.org/10.1002/rob.21890.

11

Desenvolvimento de armadilha eletrônica para o monitoramento da mosca-das-frutas sul-americana

Development of an electronic trap for monitoring the South American fruit fly

Frederico Victor Dos Santos Silva[1], Glaucio José Gomes[2], Luciano Gebler[3], Regis Sivori Silva dos Santos[3], Ricardo Sobjak[4], Paulo Cesar Tonin[5], Kelyn Schenatto[6], Claudio Leones Bazzi[7]*, Pedro Luiz de Paula Filho[8]

[1] *Academico, Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, fredericosilva@alunos.utfpr.edu.br*

[2] *Professor, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Avenida Presidente Tancredo Neves, 3838, (85870-650) Foz do Iguaçu, Brasil. E-mail: glauciogames@hotmail.com*

[3] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br*

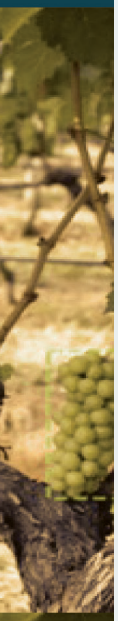
[4] *Professor, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, e-mail*

[5] *Professor, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, e-mail*

[6] *Professor, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, e-mail*

[7] *Professor, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, bazzi@utfpr.edu.br*

[8] *Professor, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, plpf2004@gmail.com*



RESUMO

Pesquisas na área de agricultura digital e de precisão possuem um papel fundamental no desenvolvimento e otimização de novas tecnologias dedicadas ao monitoramento de pragas invasoras no setor de fruticultura. Nesse contexto, as moscas do gênero *Anastrepha spp.*, conhecidas como mosca-das-frutas sul-americana, são responsáveis por perdas bilionárias em safras de várias espécies de frutas ao redor do mundo. No sul do Brasil, a variedade que tem causado maior preocupação é a *Anastrepha fraterculus*, que pode inviabilizar quase que toda a produção de um pomar, caso não seja realizado o controle em tempo hábil. Essas pragas são controladas por meio da pulverização de inseticidas, porém a eficiência desse método depende do conhecimento prévio referente a condições climáticas e à localização da infestação. O objetivo desta pesquisa foi desenvolver um sistema de hardware acoplado a um protótipo de armadilha eletrônica, capaz de registrar em tempo real a captura de insetos por meio de sensores optoeletrônicos e imagens da espécie-alvo, informando também as condições do ambiente externo (temperatura, umidade, radiação ultravioleta e localização geográfica). As informações obtidas por um conjunto de armadilhas permitem o mapeamento da infestação, viabilizando a adoção de estratégias mais efetivas ao combate quando comparado com os métodos tradicionais. Os resultados mostraram que as armadilhas eletrônicas desenvolvidas permitem a detecção da mosca-das-frutas e outras populações de insetos, bem como a coleta de informações de campo em tempo real. Contudo, evidenciamos algumas lacunas que devem ser questionadas e desenvolvidas em trabalhos futuros para a maior precisão das armadilhas eletrônicas, contribuindo assim para a redução dos custos operacionais no campo e a otimização de um manejo sustentável em diversas culturas frutíferas.

Palavras-chave: agricultura digital; sistema eletrônico; *Anastrepha fraterculus*.

ABSTRACT

Research in digital and precision agriculture plays a fundamental role in the development and optimization of new technologies dedicated to monitoring invasive pests in the fruit-growing sector. In this context, flies of the genus Anastrepha spp., known as South American fruit flies, are responsible for billion-dollar losses in harvests of various fruit species around the world. In southern Brazil, Anastrepha fraterculus is the variety that has caused the greatest concern, which can make almost the entire production of an orchard unviable without its proper control. These pests are controlled by spraying insecticides; however, the efficiency of this method depends on prior knowledge regarding climatic conditions and the location of the infestation. The objective of this research

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000043

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

was to develop a hardware system coupled to an electronic trap prototype, capable of recording in real time the capture of insects using optoelectronic sensors and images of the target species, also informing the conditions of the external environment (temperature, humidity, ultraviolet radiation, and geographic location). The information obtained by a set of traps allows the mapping of the infestation, enabling the adoption of more effective combat strategies than in traditional methods. The results showed that the electronic traps developed allow the detection of fruit flies and other insect populations, as well as the collection of field information in real-time. However, we highlight some gaps that must be questioned and developed in future work to improve the precision of electronic traps, contributing to the reduction of operational costs in the field and the optimization of sustainable management in various fruit crops.

Keywords: digital agriculture; electronic system; *Anastrepha fraterculus*.

1 INTRODUÇÃO

A produção de frutas envolve uma dinâmica de alta complexidade, considerando que, além dos altos custos de implantação dos pomares, o tempo de plantio até a colheita da primeira safra pode demorar anos e o manejo das áreas produtoras precisa ser constante, tanto para o controle de pragas, como para evitar doenças. Nesse contexto, principalmente no Brasil, a mosca-das-frutas (MdF) sul-americana (*Anastrepha fraterculus*) causa dano direto na fase final de produção de frutas e hortaliças (deformação, amadurecimento precoce e aprodrecimento), levando a perdas de produção de 40% a 80% dependendo da localidade, variedade e época do ano (Dias et al., 2018; Mutamiswa et al., 2021).

O controle desses insetos no campo é um tema desafiador e pode ser realizado por meio de diferentes estratégias no combate e manejo, como controle biológico, químico, comportamental e técnicas de inseto estéril (Abeli et al., 2021; Devescovi et al., 2021; Zheng et al., 2021), que visam à redução de prejuízos na lavoura e obtenção de produtos de alto valor agregado devido à boa aparência e qualidade. De fato, as diferentes estratégias de controle necessitam cada vez mais explorar novos conceitos sobre o ciclo de desenvolvimento da MdF.

Por outro lado, o custo para o controle da MdF é alto, considerando que envolve um protocolo de operações manuais para a instalação e inspeção (*in loco*) de armadilhas em locais distintos e de forma distribuída no pomar (pelo menos duas por hectare), para coleta de informações relacionadas à quantidade de insetos capturados para obtenção dos níveis de infestação (Speranza et al., 2022). Como a produção envolve um ciclo extenso de tempo e o monitoramento deve ser realizado de forma periódica, com mão de obra para o controle, nem sempre pode ser feito de forma efetiva, considerando problemas relacionados ao clima e ao terreno, proporcionando menor periodicidade nas inspeções e tornando o controle menos eficiente. Para solucionar esse problema, tecnologias eficientes dedicadas a desenvolver armadilhas automáticas podem ser encontradas em trabalhos prévios (Preti et al., 2021; Rigakis et al., 2021), com foco no monitoramento por imagens de insetos e detecção de insetos por sensores.

As armadilhas eletrônicas (AE) com dispositivos de câmeras em comparação com sistemas baseados em sensores tem como principal vantagem a identificação precisa de insetos e pragas invasoras, possibilitando o monitoramento em tempo real de informações agrícolas em larga escala e a longas distâncias (Preti et al., 2021). Foi demonstrado que o monitoramento remoto usando AE integra uma gestão de manejo de pragas permitindo a proteção da cultura, maior produtividade, além de melhorias na segurança de trabalho (Doitsidis et al., 2017). Do ponto de vista ambiental, o uso de tecnologias mais eficientes na captura e identificação de espécies invasoras fornecem tomadas de decisão mais rápidas no campo, resultando em maior economia na aplicação de inseticidas (Stupp et al., 2021), favorecendo um caminho economicamente viável e menos impactante.

No entanto, algumas limitações são encontradas no uso de AE para o monitoramento de espécies invasoras no campo agrícola. O custo dessa tecnologia torna-se caro para pequenos agricultores, por causa do alto valor de componentes tecnológicos, como sensores e câmeras de alta resolução (Rassati et al., 2016). A autonomia de energia elétrica no campo é necessária para longos períodos de monitoramento da praga, que também inclui coleta de dados de temperatura e umidade do ar e velocidade dos ventos, o que faz com que haja uma demanda para instalação de sistemas fotovoltaicos ou outras fontes de energias renováveis. As armadilhas podem apresentar dificuldades na detecção automática e identificação da espécie-alvo que se deseja investigar. De fato, foi demonstrado (Holguin et al., 2010) que, para algumas armadilhas usando sensores de residência e infravermelho, os insetos-alvo capturados por armadilhas eletrônicas podem causar contagens inexistentes, levando a dados contraditórios devido à subestimação de insetos capturados. Outros pesquisadores (Goldshtein et al.,

2017) observaram o mesmo efeito de subestimação de moscas presas à armadilha durante a colonização, período no qual o sistema fica sobrecarregado e não consegue discernir as moscas individualmente que entram na armadilha.

Em razão dos constantes avanços tecnológicos e das novas fronteiras de conhecimento no auge da implementação do uso de aprendizado de máquinas (Benos et al., 2021) e internet das coisas (Tzounis et al., 2017), uma vasta quantidade de informações pode ser processada no campo, em tempo real. Nesse contexto, para reduzir as limitações de AE mencionados, o objetivo desta pesquisa foi apresentar o desenvolvimento de uma solução digital, que busca substituir o processo manual de inspeção de armadilhas em pomares, bem como proporcionar o monitoramento constante da MdF em áreas produtoras, de forma automatizada, baseado no reconhecimento de imagens e em tecnologia de comunicação sem fio, realizando a identificação, contagem e transmissão das medições de dados ambientais feitas em campo para um servidor de dados, onde posteriormente, ao reunir as informações das diversas armadilhas de uma área, permite o mapeamento da infestação da praga em tempo real.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O protótipo proposto visa à instrumentação de uma armadilha do tipo Mcphail comercial, na qual foram realizadas modificações em seu interior. A parte côncava da estrutura original da armadilha foi substituída pela estrutura que suporta os sensores optoeletrônicos na armadilha, projetada usando-se o software SolidWorks e impresso em uma impressora 3D modelo GTMax 3D, proporcionando o alinhamento e isolamento dos *light emitting diode* (LED).

O sensor utilizado para detectar a passagem dos insetos no interior da armadilha foi constituído por sete LEDs emissores de infravermelhos e sete fotodiodos em cada barreira, que convertem a luz em corrente elétrica, gerando assim um sinal de tensão. Os LEDs foram associados em paralelo em diferentes barreiras, uma barreira superior e uma inferior, para identificar a direção de voo do inseto e selecionar somente os que entram realmente na armadilha.

Três amplificadores operacionais de baixa tensão alimentados em 5V presentes em uma placa de circuito impresso (PCI) atuaram como um circuito somador não inversor, para que fosse possível unir o sinal gerado por cada fotodiodo em um único sinal, além de amplificar e isolar esses sinais. Foram utilizados *light rependent resistor* (LDR) para controle da interferência da luz natural, juntamente com um filtro do tipo passa-baixas para eliminação de eventuais interferências e ruídos. Os sinais gerados pelas barreiras e pelos LDRs também foram filtrados digitalmente, possibilitando a detecção de insetos sempre que atravessavam uma das barreiras, tendo em vista que causavam queda de tensão no sinal da saída dos receptores, resultando em um sinal de leitura menor do que o sinal filtrado digitalmente. Dessa maneira, a detecção dos insetos foi gerada por meio de um novo sinal, denominado sinal de captura, que é gerado apenas quando constatada que a queda de tensão não é causada por variações de iluminação externa.

Para contabilizar e identificar as moscas capturadas por meio da AE, uma série de sensores foram utilizados, os quais estão esquematicamente ilustrados na Figura 1. O sistema de detecção foi alimentado por um painel solar de 10 W, ligado a um controlador de carga automático 12 V/24 V, com a finalidade de distribuir a energia para o circuito e duas baterias recar-

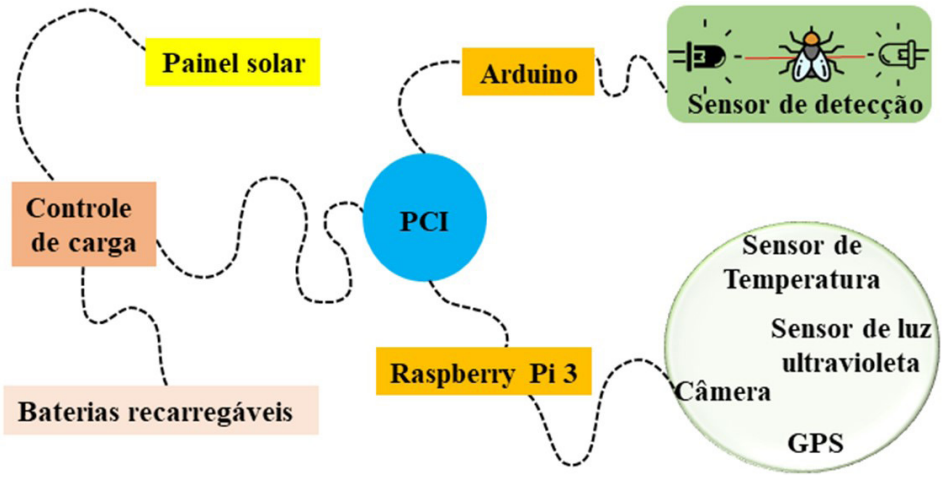


Figura 1. Esquema do sistema geral do protótipo de armadilha eletrônica e sensores de detecção.

regáveis de 12 V com capacidade de 7 Ah ligadas em paralelo com autonomia de aproximadamente 40 horas (sem que haja recarga). Com o auxílio de uma PCI que acopla um conjunto de sensores optoeletrônicos projetados por meio do software Autodesk EAGLE e confeccionados usando uma prototipadora de PCI (Modelo 1S), são enviados sinais ininterruptamente para um microcontrolador Arduino Uno (microchip ATmega328P, Mega 2560), indicando assim a entrada de qualquer inseto na armadilha e a interrupção automática do feixe de infravermelho no sensor de detecção de moscas. Esse efeito gera um sinal para um Raspberry Pi 3 (Modelo B+ Anatel), que registra automaticamente a imagem no interior da armadilha e consequentemente armazena os dados em tempo real do ambiente externo (temperatura e umidade do ar, coordenadas geográficas referentes ao local e horário da coleta da imagem).

Foram implementadas rotinas no Raspberry para coletar de dados durante a detecção das moscas efetuando o acionamento de uma câmera de captura que foi instalada na parte superior da armadilha, bem como a extração e armazenamento de informações do ambiente de cultivo, no exato momento em que recebe o sinal de captura. Os sensores utilizados para coleta de informações do ambiente de cultivo foram DHT22 para temperatura e umidade e UV UVM-30 para incidência de radiação ultravioleta. As informações de latitude e longitude das armadilhas em campo foram geradas por um Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), por meio do módulo NEO-6MV2. A captura das imagens foi realizada usando-se um módulo de câmera 5MP 160-Degree ESP32 OV5640 com lente DVP (160°).

A identificação dos insetos capturados nas AE foi feita por meio do reconhecimento de padrões de imagens do abdômen e das asas, uma vez que a MdF sul-americana possui características únicas nesses locais, permitindo sua identificação e classificação como demonstrado na literatura (Leonardo et al., 2017; Pramanik et al., 2021). Para captura das imagens, as condições de testes em ambiente controlado foram semelhantes às condições naturais, a fim de evitar diferenças do padrão comportamental dos insetos criados em cativeiro ao entrarem na armadilha.

Nesse contexto, os testes de captura das moscas-alvo foram realizados em dois ambientes, como ilustra a Figura 2. Os primeiros testes foram realizados no laboratório experimental na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Medianeira (Paraná), em um cativeiro específico desenvolvido em laboratório para analisar o comportamento dos sensores e demais sistemas eletrônicos, além da efetividade de identificação de moscas em fase adulta (*Anastrepha fraterculus*) no interior da armadilha. As moscas da espécie *Anastrepha fraterculus* foram cultivadas em cativeiro para essa fase dos experimentos. Outras três armadilhas foram testadas em campo aberto e divididas em três áreas de cultivo de maçã (área 1 = 28° 30”53”S, 50° 53’03”W; área 2 = 28° 30’54”S, 50° 53’00”W e área 3 = 28° 30’56”S, 50° 52’56”W) em colaboração com a Embrapa Uva e Vinho no município de Vacaria, RS, Brasil.

As armadilhas foram distribuídas estrategicamente dentro da propriedade e fixadas com o auxílio de estruturas metálicas mantendo a armadilha eletrônica a aproximadamente 1,5 m em relação ao solo (Figura 3b), de modo a não interferir no manejo do pomar. Cada armadilha foi carregada com proteína

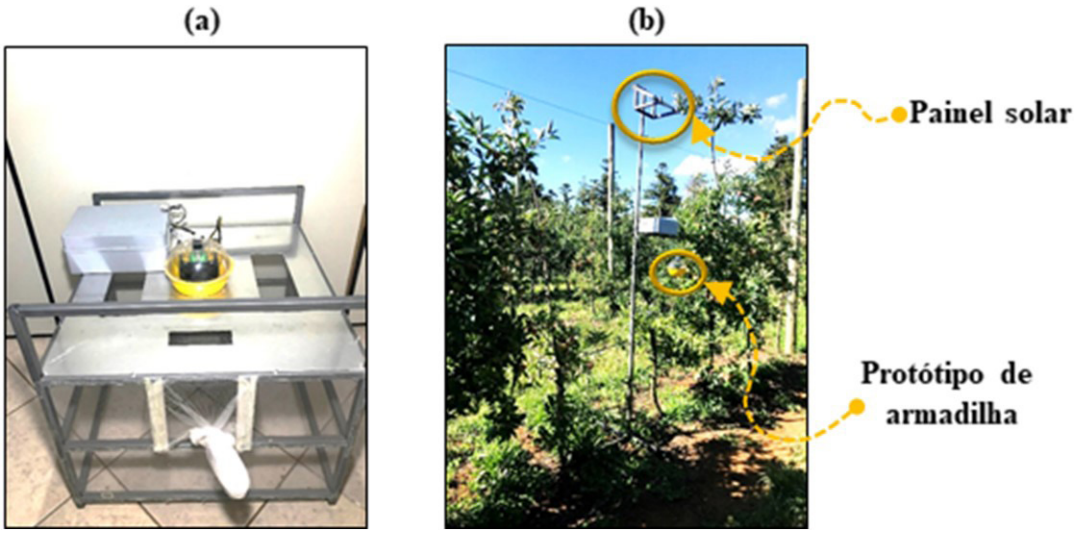


Figura 2. Estruturas de teste. (a) Ambiente de teste controlado e (b) Estrutura instalada no campo experimental.

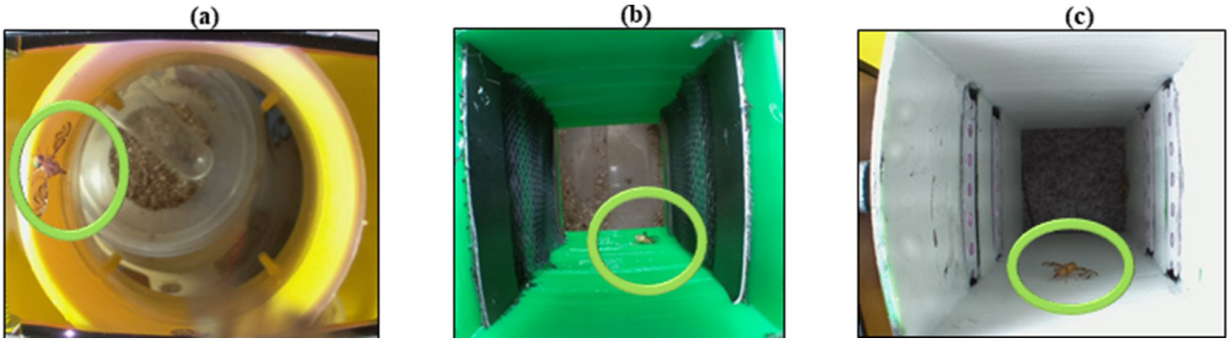


Figura 3. Caminho referente à entrada da espécie-alvo na armadilha. (a) interior da armadilha em amarelo, (b) interior da armadilha otimizada em verde, (c) interior da armadilha otimizada em branco.

hidrolisada (aproximadamente 150 ml), como atrativo usado comumente na captura da MdF. Essas armadilhas foram verificadas semanalmente durante os experimentos em campo.

Visando suportar um grande número de nós sensores a um menor custo, baixo consumo energético e considerando distâncias relativamente curtas, as armadilhas automatizadas foram equipadas com módulos de transmissão ZigBee. Esses módulos foram dispostos por meio da topologia em malha. Cada nó sensor pode se comunicar com outros nós sensores, desde que estejam dentro do alcance da rede. De acordo com a localidade das armadilhas em campo, elas foram configuradas como roteadores ou como dispositivos finais.

Os roteadores, além de enviar os dados de monitoramento e captura, desempenham também o papel de ponte entre as armadilhas. Contudo, o coordenador, junto com um Raspberry Pi 3, recebe os dados enviados pelos dispositivos finais e roteadores realizam a persistência destes em um ambiente de nuvem, previamente configurado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os testes iniciais (ambiente controlado) para as modificações da estrutura referente à armadilha eletrônica mostraram ser um tema complexo em armadilhas tipo McPhail, devido ao espaço interno da estrutura original. Por outro lado, essas modificações na estrutura poderiam afetar a atratividade referente à espécie-alvo em campo. Doitsidis et al. (2017) compararam diferentes tipos de armadilhas McPhail (vidro, plástico e automatizada) para a captura de mosca-da-azeitona (*Bactrocena oleae*), e observaram que o número médio de adultos capturados por armadilha e por semana foi significativamente maior para a armadilha McPhail de plástico de cor amarela, quando comparada com as armadilhas de vidro e a automatizada, que entre si não apresentaram diferenças significativas. Dessa forma, a cor da armadilha torna-se um importante fator para atrair os insetos, pois algumas espécies são atraídas por comprimentos de onda específicos. Embora algumas modificações tenham sido projetadas para não afetar o dimensionamento da armadilha original, o caminho de entrada das moscas pode ter causado alterações na liberação do odor do atrativo alimentar (proteína hidrolisada 5,5%) para o ambiente externo.

Para identificar a presença das moscas no interior da armadilha, avaliou-se em laboratório a captura de imagens em um ambiente controlado. Em todos os casos em que a mosca efetivamente interrompe o feixe de infravermelho, uma imagem da espécie invasora foi gerada, permitindo a fácil identificação visual pela coloração das asas. Experimentos confirmaram que é possível obter resultados com alta precisão de classificação em tarefas de identificação de MdF fazendo uso de imagens das asas e acúleos (Faria et al., 2014). Observou-se que o feixe de luz que flui dos diodos emissores para os receptores não interferiu no hábito das moscas. Contudo, observou-se uma mobilidade diferente dos insetos após um exame cuidadoso no interior do cativeiro, identificando uma baixa atração pela armadilha que poderia ser resultante da luz do ambiente de testes ou da temperatura do ambiente (18-22 ºC). De acordo com estudo anterior, o efeito de temperaturas baixas e o impacto do ambiente reduzem a abundância de insetos capturados por causa da menor atividade de moscas (Araujo et al., 2019).

O posicionamento dos sensores e o ajuste do caminho de entrada das moscas foram otimizados, promovendo testes com diferentes cores de acesso à entrada da mosca, a fim de melhorar a resolução das imagens e atratividade (Figura 3). A armadilha inicial (Figura 3a) com o caminho amarelo se mostrou eficaz quanto à identificação da mosca por meio da imagem de captura, porém os sensores optoeletrônicos ficavam

fixados na parte superior da entrada da armadilha, e em alguns casos não detectavam o momento da entrada da mosca na armadilha e estavam mais suscetíveis a sofrer interferência da luz ambiente. Nesse sentido, o caminho de acesso ao interior da armadilha (Figura 3b) foi modificado utilizando a cor verde e ajustando os sensores no caminho de entrada, resultando em uma detecção mais sensível da mobilidade e contagem de insetos. No entanto, a identificação das moscas com relação a outras espécies de insetos resultou ser mais difícil em razão da menor visibilidade (baixa resolução). Por esse motivo, na cor branca (Figura 3c) obtiveram-se melhores resultados com a detecção visual mais sensível em todas as posições da entrada da armadilha. Dessa forma, as imagens capturadas possuíam boa visibilidade e a contagem do número de mosca se tornou mais eficiente que a primeira versão do protótipo (armadilha amarela, Figura 3a).

Analisando a precisão da contagem da espécie invasora (mosca-das-frutas), usando o tubo de captura na cor branca, foi observada grande quantidade de dados falso positivos. Eles se originam pela mobilidade das moscas no interior do tubo de entrada percorrendo diversos caminhos sobre o sensor de infravermelho e causando ativação deste. Consequentemente, é gerada uma alta quantidade de dados coletados no sistema, o que implica que uma única mosca pode causar várias detecções.

Esse mesmo problema foi relatado por Jiang et al. (2008) no desenvolvimento de uma armadilha automática para monitorar a mosca-da-fruta oriental (*Bactrocera dorsalis*). Esses autores solucionaram esse problema reduzindo as dimensões do caminho de entrada das moscas no interior da armadilha, resultando em um aumento de precisão de 56,5% para 80,2%; porém, esse sistema não permitia a captura de imagens. Nesse sentido, para reduzir a quantidade de dados falso positivos, fez-se um pequeno ajuste na posição dos sensores dentro do tubo, para, além de maximizar a precisão da quantidade de moscas capturadas, permitir analisar as imagens para a verificação da presença e a identificação da espécie-alvo. Os testes em ambiente controlado mostraram inúmeras falhas que foram corrigidas na reformulação estrutural da AE e permitiram otimizar o sistema baseado em imagens para captura, identificação e contagem de diversas pragas invasoras de forma remota em tempo real.

O protótipo otimizado com os dispositivos de monitoramento para a MdF dentro do caminho de entrada, bem como a acomodação de todo o sistema eletrônico, é mostrado na Figura 4. Por meio dos testes de laboratório, foi possível compactar o protótipo inicial (Figura 4a) em um sistema mais robusto (Figura 4b), capaz de suportar adversidades ambientais e acidentes de manuseio no campo. Nesse protótipo, todo o sistema de eletrônica embarcada (arduino, PCI e Raspberry) foi fixada ao lado da fonte de energia (baterias), e esse sistema fechado armazena todas as informações geradas pela armadilha eletrônica. Por isso, nos testes de laboratório a parte de abastecimento de energia e armazenamento de informações era instalada próxima ao protótipo.

Nos testes de campo, três protótipos de armadilhas eletrônicas foram construídos em laboratório e montados estrategicamente dentro de um pomar de maçã, localizado no município de Vacaria/RS, para testar o desempenho da armadilha em condições reais de trabalho de campo.

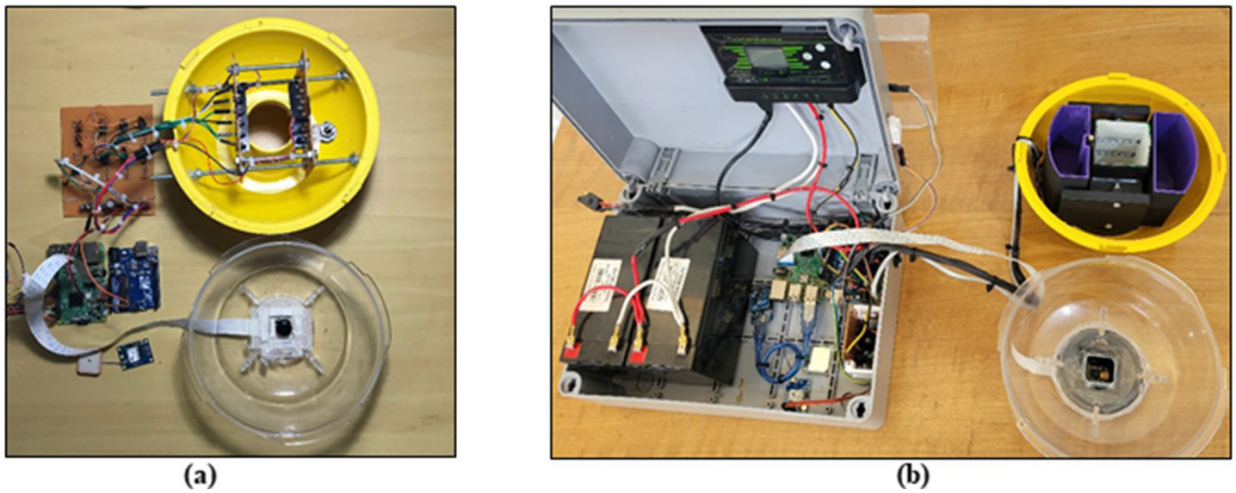


Figura 4. Comparação de armadilhas eletrônicas. (a) protótipo inicial e (b) protótipo otimizado.

Para verificar a eficiência da captura e contagem de MdF, foram feitas diariamente verificações manuais. Os dados de campo e a captura de moscas foram transferidos na forma de histórico para um banco de dados alocado na propriedade onde ocorreram os experimentos. Todos os sistemas foram avaliados em campo nos meses de dezembro de 2020 e julho-outubro de 2021.

Cada armadilha instalada registrou as informações de geolocalização, temperatura e umidade do ar, luz ultravioleta e o número de espécies-alvo capturadas. Inicialmente, o comportamento de uma única armadilha foi avaliada, sendo esta instalada em um pomar de maçãs em dezembro de 2020, relacionando os dados de temperatura do ar e captura de moscas em um período de 24h. Inicialmente, identificou-se baixa ou nenhuma atividade das moscas nas primeiras horas do dia; contudo, com o aumento da temperatura, observou-se uma maior captura e identificação da MdF sul-americana. Nesse sentido, essa primeira análise indicou que a melhor faixa de captura ocorreu próximo às 6h00, estendendo-se até às 18h00. Com isso, foi possível relacionar a captura de moscas com a variação de temperatura do ambiente externo. Isso sugere que o protótipo desenvolvido permite obter informações em tempo real de modo simples e econômico, mostrando que em temperaturas do ar acima de 16 ºC, a atividade das moscas nos pomares pode ser identificada.

Durante essa primeira análise, identificaram-se as melhores condições para a instalação das armadilhas, uma vez que essa espécie (*Anastrepha fraterculus*) possui maior atividade diurna em uma determinada faixa de temperatura do ar. Recentemente foi demonstrado que uma alta taxa metabólica leva ao aumento do envelhecimento em todas as linhagens de MdF, e a temperatura do ar tem um efeito significativo na fecundidade e no peso corporal (Mołoń et al., 2020). Huang et al. (2020) mostraram que a taxa de sobrevivência de *Bactrocera tau* diminuiu gradualmente em todos os estágios após exposição a altas temperaturas do ar (acima de 42 ºC) de curto prazo. Essas observações relatadas por outros grupos de pesquisa poderiam explicar a maior atividade das moscas em condições mais elevadas de temperatura do ar. Contudo, apesar da expectativa de que em temperaturas maiores do que as observadas no experimento de 24h fossem obtidas maiores capturas de moscas nos pomares investigados, isso não foi observado.

O posicionamento do protótipo entre as árvores de maçã foi suspenso por um tripé evitando a presença de predadores (formigas, aranhas, etc.) que poderiam adentrar nas armadilhas e interferir na contagem da espécie-alvo. O posicionamento das armadilhas fixadas entre as culturas ou em hastes de metal não afeta o desempenho referente à captura de moscas (Kaspi; Yuval, 1999). No entanto, as AE ficaram expostas diretamente ao sol, o que proporcionou interferências nas imagens observadas principalmente durante 11h30min e 13h00, como observado inicialmente em laboratório. Foi necessário reforçar o recobrimento da parte superior dos protótipos, resultando em maior confiabilidade para o monitoramento e captura de imagens. Estudos com períodos mais extensos no futuro devem avaliar o desempenho da armadilha otimizada para o manejo integrado de pragas no cultivo de maçã.

Experimentos preliminares usando o sistema (armadilhas eletrônicas) permite o compartilhamento de dados do ambiente (campo experimental) em forma de texto (histórico) por meio da transmissão via radiofrequência, transformando os dados em formato ".csv" para JSON, que são armazenados no InfluxDB (banco de dados de séries temporais), enquanto as imagens (fotos das moscas capturadas) são armazenadas *in loco* em um microSD. A transmissão do arquivo ".csv" já é suficiente para a geração de mapas de movimentação das moscas no pomar, permitindo o monitoramento da praga no espaço do pomar em tempo real (Speranza et al., 2022).

Evidenciou-se que o processo de transferência de dados é eficiente, uma vez que o Raspberry Pi está ligado ao coordenador da rede ZigBee por meio do protocolo HTTP (HyperText Transfer Protocol), formando uma conexão estável e segura com o servidor InfluxDB. Logo, a comunicação entre as armadilhas e o banco de dados permite reduzir o custo de mão de obra referente à verificação de captura de moscas no campo. Além disso, o treinamento da equipe para utilização do sistema também demanda custo baixo, em razão da simplicidade e nível de automatização do equipamento.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta pesquisa foram desenvolvidas armadilhas eletrônicas para o monitoramento remoto da mosca-das-frutas por captura de imagens, avaliadas em condições de laboratório e em um campo experimental sob condições reais de trabalho. Os resultados mostraram que as armadilhas eletrônicas desenvolvidas possuem eficiência na detecção da mosca-das-frutas sul-americana e outras populações de insetos, bem como a coleta de informações de campo em tempo real. Os testes em campo experimental mostraram que o sistema desenvolvido pode atuar de forma au-

tônoma com o auxílio do sistema de painéis solares gerando um baixo consumo de energia, o que resulta em menores processos de manutenção durante a coleta de dados. As imagens capturadas possuem boa resolução, permitindo identificar a mosca-das-frutas sul-americana e outras espécies de insetos invasores.

Identificou-se no protótipo que os insetos-alvo que entram na armadilha não são mortos imediatamente e podem interferir no sinal do infravermelho, causando sinais falso positivos. Nesse mesmo sentido, observou-se a dificuldade de realizar a comunicação de radiofrequência a longas distâncias, uma vez que as armadilhas instaladas entre os pomares ficam suscetível à interferência do ambiente quando instaladas com distâncias acima de 50 m, sendo necessário o uso de tecnologias mais eficientes como LoRa/LoRaWAN. Contudo, a proposta de armadilha eletrônica após as modificações necessárias permitirá a substituição da armadilha McPhail comercial, otimizando o monitoramento e reduzindo custos de manejo para diversas culturas frutíferas que atualmente utilizam a armadilha convencional. Trabalhos futuros dedicados no aprimoramento do protótipo automatizado tendem a investigar a eficiência da atratividade e compará-lo com as armadilhas comerciais, uma vez que não fica evidente o impacto das modificações da estrutura da armadilha no microclima. Testes de maior tempo em campo deverão mostrar resultados mais precisos e promissores na sustentabilidade econômica do sistema, bem como a transmissão de imagens terá de ser otimizada, resultando em uma contagem de moscas mais eficiente, para reduzir a quantidade de informações armazenadas no servidor.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, ao Laboratório de Agrotecnologias - AgriLab, da UTFPR - Medianeira, à Fundação Araucária, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à Fundação Parque Tecnológico de Itaipu, e à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) pelo apoio recebido.

REFERÊNCIAS

ABELI, P. J.; FANNING, P. D.; ISAACS, R.; BEAUDRY, R.M. Blueberry fruit quality and control of blueberry maggot (Rhagoletis mendax Curran) larvae after fumigation with sulfur dioxide. **Postharvest Biology and Technology**. v.179, p.111568, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111568.

ARAUJO, E. S.; MONTEIRO, L. B.; MONTEIRO, R.S.; NISHIMURA, G.; FRANCK, P.; LAVIGNE, C. Impact of native forest remnants and wild host plants on the abundance of the South American fruit fly, Anastrepha fraterculus in Brazilian apple orchards. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 275, p. 93-99, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.02.007.

BENOS, L.; TAGARAKIS, A. C.; DOLIAS, G.; BERRUTO, R.; KATERIS, D.; BOCHTIS, D. Machine Learning in Agriculture: A Comprehensive Updated Review. **Sensors**, v. 21, p. 3758, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/s21113758.

DEVESCOVI, F.; HURTADO, J.; TAYLOR, P. W. Mating-induced changes in responses of female Queensland fruit fly to male pheromones and fruit: A mechanism for mating-induced sexual inhibition. **Journal of Insect Physiology**, v. 129, p. 104195, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2021.104195.

DIAS, N. P.; ZOTTI, M. J.; MONTOYA, P.; CARVALHO, I. R.; NAVA, D. E. Fruit fly management research: A systematic review of monitoring and control tactics in the world. **Crop Protection**, p. 112, v. 187-200, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cropro.2018.05.019.

DOITSIDIS, L.; FOUSKITAKIS, G. N.; VARIKOU, K. N.; RIGAKIS, I. I.; CHATZICHRISTOFIS, S. A.; PAPAFILIPPAKI, A. K.; BIROURAKI, A. E. Remote monitoring of the Bactrocera oleae (Gmelin) (Diptera: Tephritidae) population using an automated McPhail trap. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 137, p. 69-78, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.03.014.

FARIA, F. A.; PERRE, P.; ZUCCHI, R. A.; JORGE, L. R.; LEWINSOHN, T. M.; ROCHA, A.; TORRES, R. D. S. Automatic identification of fruit flies (Diptera: Tephritidae). **Journal of Visual Communication and Image Representation**, v. 25, p. 1516-1527, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2014.06.014.

GOLDSHTEIN, E.; COHEN, Y.; HETZRONI, A.; GAZIT, Y.; TIMAR, D.; ROSENFELD, L., GRINSHPON, Y.; HOFFMAN, A.; MIZRACH, A. Development of an automatic monitoring trap for Mediterranean fruit fly (Ceratitis capitata) to optimize control applications frequency. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 139, p. 115-125, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.04.022.

HOLGUIN, G. A.; LEHMAN, B. L.; HULL, L. A.; JONES, V. P.; JONES, V. P.; PARK, J. Electronic Traps for Automated Monitoring of Insect Populations. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 43, p. 49-54, 2010. DOI: https://doi.org/10.3182/20101206-3-JP-3009.00008.

HUANG, Y.; GU, X.; PENG, X.; TAO, M.; CHEN, G.; ZHANG, X. Effect of short-term high-temperatures on the growth, development and reproduction in the fruit fly, Bactrocera tau (Diptera: Tephritidae). **Scientific Reports**, v. 10, p. 6418, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-020-63502-w.

JIANG, J. A.; TSENG, C. L.; LU, F. M.; YANG, E. C.; WU, Z. S.; CHEN, C. P.; LIN, S. H.; LIN, K. C.; LIAO, C. S. A GSM-based remote wireless automatic monitoring system

for field information: A case study for ecological monitoring of the oriental fruit fly, Bactrocera dorsalis (Hendel). **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 62, p. 243-259, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.01.005.

KASPI, R.; YUVAL, B. Mediterranean Fruit Fly leks: factors affecting male location. **Functional Ecology**, v. 13, p. 539-545, 1999. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1999.00344.x.

LEONARDO, M. M.; AVILA, S.; ZUCCHI, R. A.; FARIA, F. A. Mid-level Image Representation for Fruit Fly Identification (Diptera: Tephritidae). **IEEE 13th International Conference on e-Science**, p. 202-209, 2017. DOI: https://doi.org/10.1109/eScience.2017.33.

MOŁOŃ, M.; DAMPC, J.; KULA-MAXIMENKO, M.; ZEBROWSKI, J.; MOŁOŃ, A.; DOBLER, R.; DURAK, R.; SKOCZOWSKI, A. Effects of Temperature on Lifespan of Drosophila melanogaster from Different Genetic Backgrounds: Links between Metabolic Rate and Longevity. **Insects**, v.11, p. 470, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/insects11080470.

MUTAMISWA, R.; NYAMUKONDIWA, C.; CHIKOWORE, G.; CHIDAWANYIKA, F. Overview of oriental fruit fly, Bactrocera dorsalis (Hendel) (Diptera: Tephritidae) in Africa: From invasion, bio-ecology to sustainable management. **Crop Protection**, v. 141, p. 105492, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105492.

PRAMANIK, S.; DEBNATH, P.; PANDIT, M. K.; GUPTA, A. K.; NASKAR, M. K. Fruit fly species diversity, population dynamics and infestation rate during fruiting season of snake gourd. **South African Journal of Botany**, v.145, p. 303-312, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.09.021.

PRETI, M.; VERHEGGEN, F.; ANGELI, S. Insect pest monitoring with camera-equipped traps: strengths and limitations. **Journal of Pest Science**, v. 94, p. 203-217, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s10340-020-01309-4.

RASSATI, D.; FACCOLI, M.; CHINELLATO, F.; HARDWICK, S.; SUCKLING, D. M.; BATTISTI, A. Web-based automatic traps for early detection of alien wood-boring beetles. Entomologia Experimentalis et Applicata, v. 160, p. 91-95, 2016. DOI: https://doi.org/10.1111/eea.12453.

RIGAKIS, I. I.; VARIKOU, K. N.; NIKOLAKAKIS, A. E.; SKARAKIS, Z. D.; TATLAS, N. A., POTAMITIS, I. G. The e-funnel trap: Automatic monitoring of lepidoptera; a case study of tomato leaf miner. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 185, p. 106154, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106154.

SPERANZA, E. A.; GREGO, C. R.; GEBLER, L. Analysis of pest incidence on apple trees validated by unsupervised machine learning algorithms. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 30, p. 63-74, 2022. DOI: https://doi.org/10.13083/reveng.v30i1.12919.

STUPP, P.; JUNIOR, R. M.; NORA CARDOSO, T. D.; PADILHA, A. C.; HOFFER, A.; BERNARDI, D.; BOTTON, M. Mass trapping is a viable alternative to insecticides for management of Anastrepha fraterculus (Diptera: Tephritidae) in apple orchards in Brazil. **Crop Protection**, v. 139, p. 105391, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105391.

TZOUNIS, A.; KATSOULAS, N.; BARTZANAS, T.; KITTAS, C. Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. **Biosystems Engineering**, v. 164, p. 31-48, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007.

ZHENG, F.; LI, T.; XU, H.; HU, P.; WANG, R.; ZHANG, Z.; JIA, J. Long-lasting repellent activities of eco-friendly polyurethane system for controlled citral against melon fly. **Crop Protection**, v. 148, p. 105745, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105745

12

Um exemplo de aplicação da filosofia "Faça Você Mesmo" para suprir a falta de instrumentação na fruticultura de precisão: construção de estação meteorológica de baixo custo

An example of applying the philosophy of "Do It Yourself" to overcome the lack of instrumentation in precision fruit growing: construction of a low-cost meteorological station

Luciano Gebler[1], Mirabor José Leite Júnior[2], Lucas de Ross Marchioretto[3]

[1] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br*
[2] *Engenheiro Agrônomo, Mestre, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria (RS), Brasil, mirabor@outlook.com*
[3] *Doutor em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), Brasil, lucas.marchioretto@ufgrs.br*

RESUMO

A fruticultura vem se destacando como uma das principais atividades agrícolas do país, exercendo grande influência sobre o setor social e econômico pela geração de emprego e renda em pequenas áreas e o alto valor agregado em seu produto. Por se tratar de uma atividade realizada, na maioria das vezes, de forma manual e convencional, ela possui um grande potencial de crescimento tecnológico, principalmente ao adotar os conceitos aplicados pela agricultura de precisão (AP). Por ser uma atividade que depende de fatores climáticos que em geral não podem ser controlados, o monitoramento de variáveis ambientais é uma importante ferramenta para o planejamento de ações no pomar, sejam elas preventivas ou corretivas. Um dos grandes problemas é que a agricultura, por ser exercida em um ambiente aberto sem a capacidade de controle total, quando apresenta variabilidade de resposta, demanda que a instrumentação seja dimensionada sob medida para cada local, pois o ambiente produtivo é alterado rapidamente na paisagem. Isso pode dificultar o uso de equipamentos comerciais, dado o custo elevado que normalmente é observado. Para atender a essa crescente demanda por informações e tecnologias, o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de uma microestação meteorológica de baixo custo baseando-se na filosofia "Faça você mesmo". Foram utilizados sensores de temperatura e umidade do ar, luminosidade, entre outros, que coletam dados ambientais que permitem criar subsídios para tomadas de decisões. Além dos sensores, a estação possui módulo de armazenamento de dados e relógio em tempo real para serem tratados e interpretados pelo usuário final. O dispositivo construído se mostrou eficiente na coleta de dados como as estações meteorológicas comerciais e oficial do INMET, o que foi verificado por meio de testes de validação em laboratório e campo.

Palavras-chave: arduino; agricultura de precisão; monitoramento.

ABSTRACT

Fruit growing has stood out as one of the main agricultural activities in the country, exerting great influence on the social and economic sectors through the generation of employment and income in small areas and the high-added value of its product. As it is an activity carried out, most of the time, manually and conventionally, it has great potential for technological growth, especially when adopting the concepts applied by precision agriculture (PA). As it is an activity that depends on climatic factors that in most cases cannot be controlled, monitoring environmental variables is an important tool for planning actions in the orchard, whether preventive or corrective. One of the biggest problems is that as agriculture is carried out in an open environment without the capacity for total control when it presents response variability, the instrumentation must be tailored to each location since

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000044

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

the productive environment changes quickly in the landscape. This can make the use of commercial equipment difficult, given the high cost that is normally observed. To meet this growing demand for information and technologies, the present work aims to develop a prototype of a low-cost micrometeorological station based on the "do it yourself" philosophy. We used sensors for air temperature, humidity, and luminosity, among others, which collect environmental data that creates support for decision-making. In addition to the sensors, the station has a data storage module and a real-time clock to be processed and interpreted by the end user. The constructed device proved to be efficient in collecting data like commercial and official INMET meteorological stations, which was verified through validation tests in the laboratory and field.

Keywords: arduino; precision agriculture; monitoring.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem havido uma série de tentativas de se aplicar as técnicas de agricultura de precisão (AP) utilizadas em culturas anuais ou bianuais na fruticultura, sem, entretanto, obter a mesma taxa de sucesso. Sabe-se que à medida que a planta perene envelhece, ela acumula reservas e sofre antropização expressiva, afastando-a das condições regidas somente pelo fornecimento da adubação, condição basilar para a AP em plantas de ciclo anual. A partir dessa constatação, torna-se necessária a aplicação de novas técnicas de AP voltadas às culturas perenes, sendo que o controle de dados e geração da informação ao longo do tempo tem aumentado sua importância.

À medida que o tamanho das áreas de produção aumenta, o custo da mão de obra torna-as impeditivas para a coleta, organização e manutenção de dados, inviabilizando a aplicação das técnicas necessárias. Assim, a instrumentação do pomar ou vinhedo passou a ser uma opção viável para o sucesso da fruticultura de precisão, principalmente em grandes áreas de cultivo, onde nem sempre ela está disponível, seja pela inexistência de equipamentos adaptados às condições edáficas brasileiras, ao sistema de condução adotado nos pomares, seja pelo custo do equipamento.

Para suprir esse vácuo, é possível lançar mão de princípios do movimento "Faça você mesmo", do inglês "Do it yourself" (DIY), criado em 1912 e com grande força atualmente em diversas áreas da economia mundial (Gebler, 1997; Mintel, 2005). Em sua versão atualizada, também conhecida como movimento "maker", esta filosofia prega que é possível criar ou consertar qualquer objeto a partir de peças simples e conhecimentos compartilhados, plenamente aplicável a qualquer sistema eletrônico, a partir de módulos de diversas plataformas disponíveis no mercado (Arduino, Adafruit, Zetta, dentre outras) ou mesmo construir utilizando uma impressora 3D (Pearce, 2012).

A principal vantagem desse movimento é a disponibilização de soluções sob medida para os problemas a baixo custo, bastando para isso a delimitação do problema e um algoritmo para sua resolução. Uma das áreas em que esse movimento "maker" teria aplicação imediata e ampla na fruticultura hoje em dia é a coleta de informações meteorológicas pontuais em pomares e vinhedos, respeitando sua variabilidade espacial e a configuração das plantas, gerando dados microclimáticos (Paula et al., 2017).

Um dos relatos mais constantes acerca da dificuldade de sua obtenção e manutenção de uma série temporal confiável é a distância entre as estações meteorológicas disponíveis (oficiais e comerciais) e o ponto de interesse (confiabilidade dos dados).

No Brasil, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) administra mais de 750 estações, convencionais ou automáticas, espalhadas por todo o território nacional, e que monitoram condições climáticas relevantes não apenas para o agronegócio brasileiro, como também para todos os outros setores da economia. Dessa forma, sua missão é prover informações meteorológicas à sociedade brasileira e influir construtivamente no processo de tomada de decisão, contribuindo para o desenvolvimento sustentável do país (Instituto Nacional de Meteorologia, 2024). Ainda assim, o volume de estações meteorológicas instaladas em nosso extenso território ainda é considerado baixo devido a sua importância, especialmente para a agricultura (Vianna et al., 2021).

Uma alternativa à falta de informações provenientes dessas estações meteorológicas, principalmente em áreas remotas ou de difícil acesso, é a aquisição de unidades comerciais (Monteiro, 2009). Porém, o alto custo de aquisição, instalação e manutenção desses equipamentos, considerado proibitivo pela maioria dos produtores, reforça a necessidade do desenvolvimento de uma solução mais barata, robusta, confiável e com potencialidades de formação de redes, principalmente se forem consideradas a utilização de sensores de baixo custo, aliada à facilidade de integração com sistemas informatizados, levando em conta a relação custo-benefício (Armani; Galvani, 2006; Krishnamurthi et al., 2015).

Sendo assim, utilizando como base a filosofia DIY e atendendo a essa crescente demanda por informações e tecnologias no monitoramento de variáveis ambientais, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de sistemas de sensores para coleta de dados meteorológicos pontuais (micro e mesometeorológicos) de baixo custo, permitindo sua aplicação por qualquer tamanho de produção e propriedade.

2 PRIMEIRO EXEMPLO: CONSTRUINDO UMA MICROESTAÇÃO METEOROLÓGICA

Inicialmente, devido à necessidade de execução de um trabalho envolvendo monitoramento climático em pomares, houve a necessidade de construção de uma estação meteorológica que atendesse à demanda existente dentro do prazo de um ano. Esta construção deu-se a partir da plataforma Arduino, escolhida pelo seu baixo custo, disponibilidade de peças e sensores variados no mercado varejista, além de dispor de autorização Creative Commons, tanto para hardware como software, facilitando sua programação e montagem, sem oposição de obrigações legais e comerciais e seguindo os critérios da filosofia DIY.

Por ser uma plataforma de código aberto, diversos usuários em todo mundo criam suas próprias bibliotecas e programas que podem ser compartilhados sem restrição, o que facilita o desenvolvimento de projetos e aperfeiçoamento de sistemas que utilizem este padrão (Banzi; Shiloh, 2011).

A montagem da estação foi realizada utilizando conhecimentos básicos de eletrônica e microeletrônica e consultas a sites da comunidade DIY, sem a necessidade de contratação de especialista. Inicialmente foi feita a escolha da plataforma da microcontroladora, que é uma unidade de processamento capaz de manipular variáveis do ambiente externo, transformadas em um sinal elétrico correspondente, por meio de sensores ligados aos seus terminais de entrada. Uma vez recebido o dado, ele poderá ser manipulado computacionalmente através de um ambiente de programação com linguagem específica, também conhecida pela sigla IDE (Integrated Development Environment). Posteriormente, foi feita a seleção dos sensores que deveriam fazer parte da estação, que atendiam às necessidades de controle ambiental nas plantas do pomar:

a) Sensor de temperatura do ar e umidade relativa do ar (DHT22): é um componente eletrônico de baixo custo e alta precisão que permite fazer leituras de temperaturas entre -40 ºC e +80 ºC, com uma acurácia de 0,5 ºC (máximo: 1,0 ºC), e umidade na faixa de 0 a 100%, com uma acurácia de 2,0%, sendo muito fácil de usar com as plataformas Arduino, Raspberry e outros microcontroladores, pois possui apenas um pino com saída digital.
b) Sensor de luminosidade (BH1750) integrado ao módulo GY-302: módulo que atende bem a necessidade de monitoramento da luminosidade na forma digital, tendo como base o circuito integrado BH1750, com interface I2C, cuja unidade de medida em lux tem a capacidade de dizer o fluxo luminoso em uma determinada área.
c) Sensor de molhamento foliar, na forma de placas, responde ao ambiente variando entre o estado de alta energia (high = 1), quando o clima está seco, e o estado de baixa energia (low = 0), quando há o molhamento, por exemplo, por uma gota de chuva, permitindo criar uma variação de estado de molhamento. Tais placas são revestidas em ambos os lados com um tratamento de níquel contra oxidação, melhorando assim a condutividade, desempenho e duração.
d) Sensor de umidade do solo de fácil manuseio e leitura, mas necessita de calibração para avaliar corretamente a disponibilidade hídrica do sistema. O limite entre seco e úmido pode ser ajustado para uma escala percentual por meio do potenciômetro presente no sensor, com uma regulagem do valor analógico que varia de 1 a 1024, nativo do sensor, para um valor entre 0 e 100%.
e) Módulo Datalogger com SD Card e Relógio de Tempo Real (RTC) (DS1307): permite a coleta obtida pelos sensores e o armazenamento de informações em um cartão de memória SD, coordenados pela microcontroladora e sua programação. Além disso, o RTC tem por função fornecer informações de data e hora, fundamentais para a organização do banco de dados no cartão de memória. Isso permite também que a microcontroladora controle os intervalos de tempo para a coleta dos dados, feitas em intervalos de tempo programados.

Todos esses componentes utilizam como interligação uma matriz de contato (*protoboard*), que é útil na etapa de testes da configuração da arquitetura do dispositivo, sendo utilizada como base para a criação de circuitos eletrônicos. Ela contém furos ligados tanto no eixo vertical como no horizontal, permitindo sua conexão através de placas metálicas para cada eixo, localizada logo abaixo da superfície. Seu uso permite dispensar momentaneamente o uso de solda durante a fase de prototipagem de circuitos, efetuando-se as ligações provisórias por meio de fios conectores, também popularmente chamados de *jumpers*.

Antes de incorporar os componentes na *protoboard*, foram realizados testes individuais em cada sensor diretamente no hardware (microcontroladora) para a construção do primeiro protótipo da estação, tornando possível a melhor compreensão da funcionalidade dos componentes para realização da montagem das versões funcionais.

Para o uso projetado dessa primeira estação, foi dispensado um sistema de energização complementar, utilizando-se somente baterias para o período de coleta de dados, através de um *powerbank* de 10.000 mA. Pelo consumo do equipamento montado, esta bateria foi suficiente para funcionamento do sistema por cinco dias, sendo substituído por uma bateria recarregada ao final desse período, quando eram coletados também os dados do cartão de memória.

A necessidade de energização complementar desses sistemas, que mantém a bateria sempre carregada, deve ser considerada ponto a ponto, pois haverá casos em que o aporte poderá utilizar a rede elétrica disponível próxima de pomares, ou quando não há disponibilidade de rede, seja feita através de luz solar, eólica ou mesmo de microgeradores hidrelétricos.

Uma vez solucionada a questão da energização, foi realizada a programação do protótipo da estação através do ambiente de programação do Arduino, baseando-se no apoio fornecido por sites da comunidade DIY e em *scripts* de programação já compilados e disponibilizados para alguns dos sensores (Anexo A).

Alguns dos pacotes de programação necessários ao projeto não foram encontrados prontos e tiveram de ser desenvolvidos, como, por exemplo, os dados de luminosidade, que foram convertidos em radiação solar por meio de um cálculo matemático a partir do valor aferido pela estação construída (em lux), para a unidade de medida aferida na estação meteorológica oficial do INMET (KJ/m^2), seguindo estudo realizado por Michael (2019), que estabeleceu um guia teórico e laboratorial de conversão, cujo fator de conversão é apresentado na equação 1:

$$Rad = Lum / 116 \times 3,6 \quad (1)$$

Em que:
Lum é a luminosidade (lux) e Rad é a radiação visível (KJ/m^2)

O equipamento (Figura 1) foi validado no campo em comparação com uma estação oficial do INMET e duas estações comerciais tradicionais, comprovando sua funcionalidade, robustez e confiabilidade para o trabalho (Figura 2). Posteriormente, foi operado

Figura 1. Instalação d equipamento e posicionamento dos sensores de luminosidade[1] (A), temperatura e umidade (B), molhamento foliar (B) e umidade do solo (C).

em duas condições ambientais (com e sem cobertura de tela antigranizo), avaliando seu comportamento em relação às estações comerciais instaladas próximas aos modelos DIY (Figura 3).

Os detalhes construtivos e demais informações sobre o trabalho com a estação podem ser encontrados em Leite Junior (2022).

3 SEGUNDO EXEMPLO: CONSTRUINDO E OPERANDO UM RADIÔMETRO PARA DUAS LEITURAS SIMULTÂNEAS DE LUMINOSIDADE

Em um experimento envolvendo um pomar de macieira com a cobertura de tela antigranizo, foi necessária a determinação das modificações sobre o microclima. Para isso, havia a disponibilidade de duas estações meteorológicas que somente mediam a temperatura e a umidade relativa do ar, sendo uma esta-

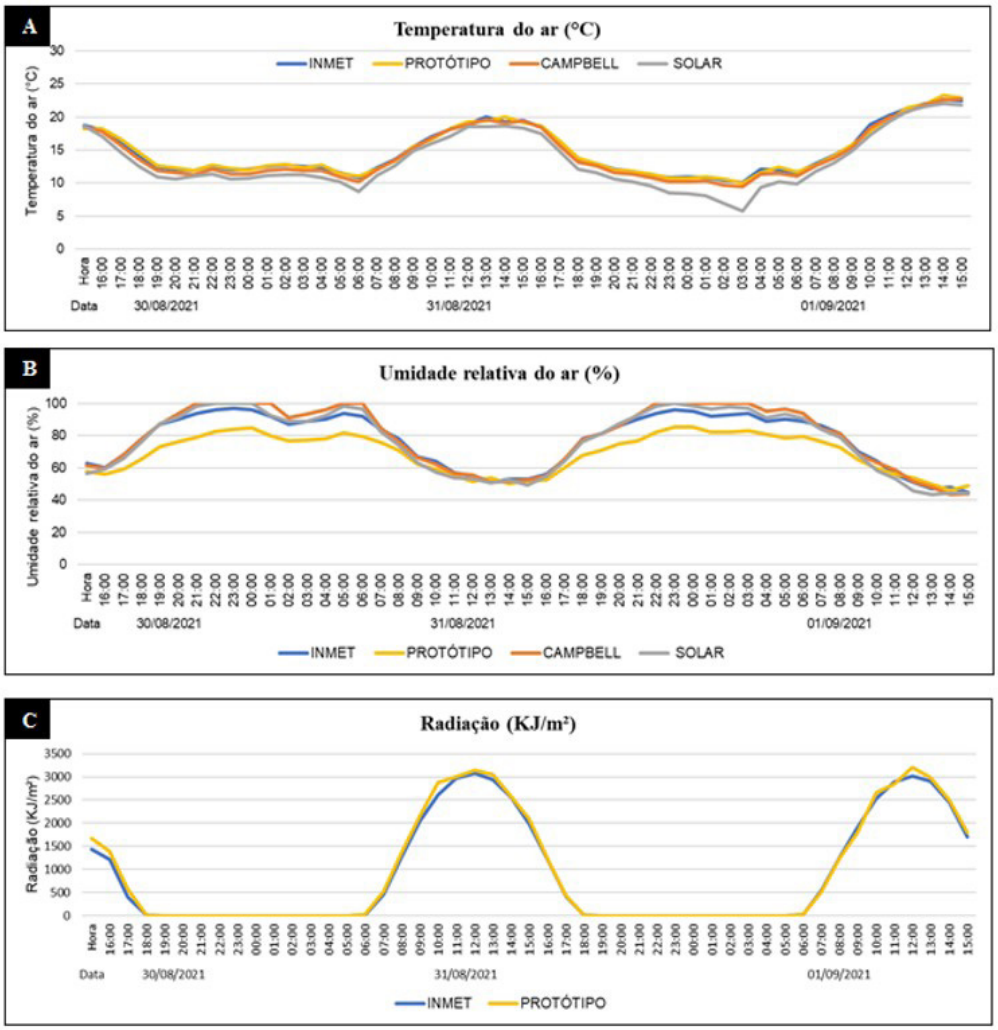


Figura 2. Resultados das comparações entre o protótipo, estações meteorológicas Campbell, Solar e padrão INMET para as variáveis de temperatura do ar (A), umidade relativa do ar (B) e radiação solar (C).

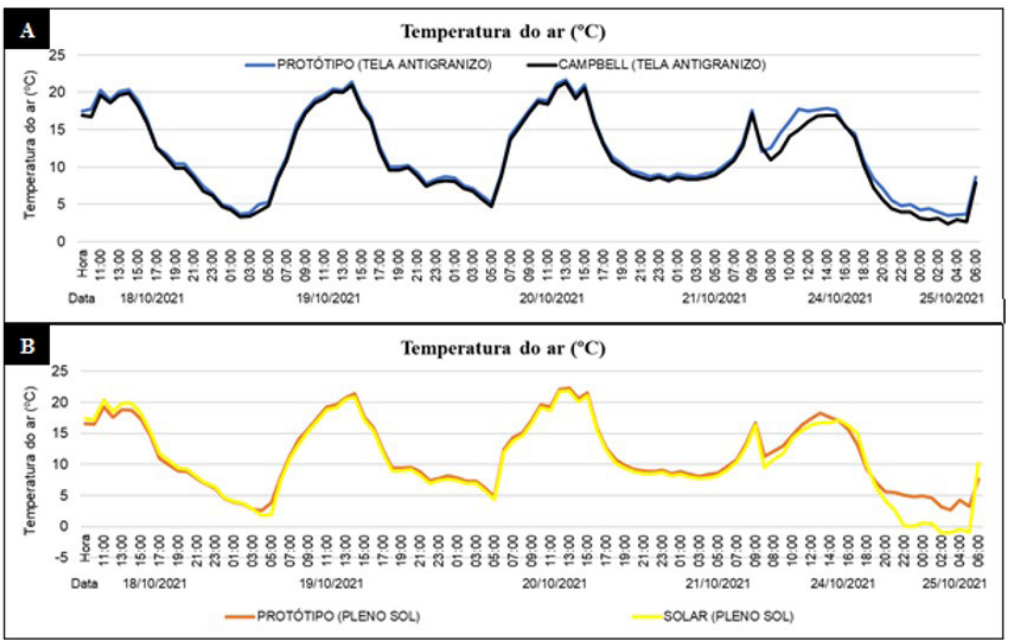


Figura 3. Temperatura do ar em pomar de macieira cultivado sob tela antigranizo (A) e a pleno sol (B) registrada por duas estações meteorológicas comerciais (Campbell e Solar) e o equipamento DIY desenvolvido.

ção instalada no meio de filas em uma área sem a cobertura de tela, e outra em um local com cobertura. Para a determinação do percentual de sombreamento imposta pela tela juntamente à estação instalada nesse ambiente, foi montado um radiômetro construído em plataforma Arduino. O radiômetro requeria dois sensores de luz para fazer leituras simultâneas, acima e abaixo da tela antigranizo (Figura 4), permitindo a leitura da radiação fotossinteticamente ativa entre 400 nm e 700 nm.

Figura 4. Montagem dos sensores de luz a campo para leituras simultâneas de luminosidade.

Para isso, foi utilizado um controlador Arduino Uno, alimentado pela tomada USB 5 V disponível no controlador de carga da estação meteorológica. Junto ao controlador foi adicionado um *shield datalogger* Adafruit v1.0 e um cartão de memória, em que a cada 15 minutos eram registrados em um arquivo de texto (.txt) a data, a hora e os valores de luminância (Lux) do sensor 1 e sensor 2 na mesma linha do texto.

A parte física (hardware) do radiômetro foi construída utilizando-se caixas plásticas Gerbox, com tampas perfuradas por um ferro de solda para a fixação com cola quente do sensor de luz BH1750, e coberta com uma metade de bolas de natal de acrílico transparente vedadas nas bordas também com cola quente. A conexão entre cada sensor e o Arduino foi feita com cabo de alarme de quatro vias (preto, vermelho, verde e amarelo). No sensor localizado acima da tela (pleno sol), a ligação dos fios foi feita na seguinte sequência: fio vermelho foi ligado à saída VCC do sensor, fio preto ao GND, amarelo à saída SCL, e verde à saída SDA. No sensor instalado abaixo da tela antigranizo, foram feitas as mesmas ligações, porém na saída ADDR do sensor foi conectado mais um fio vermelho.

Em uma placa de circuito impresso, foram soldadas quatro fileiras de pinos para a conexão dos fios, sendo uma fileira correspondente para cada saída dos sensores. Para as saídas SDA, SCL e GND, foram deixados três pinos, e para VCC foram deixados quatro pinos, pois um deles foi utilizado pela saída ADDR do sensor instalado abaixo da tela antigranizo. O primeiro pino de cada fileira de pinos do circuito impresso foi usado para ligar ambos sensores ao Arduino. O fio vermelho foi ligado à saída 3,3 V; o preto à GND; o verde à A4; e o amarelo à A5 do Arduino Uno, conforme mostrado na Figura 5.

O sensor de luz BH1750 tem como característica se comunicar com o controlador via I2C e possuir dois endereços, sendo o primeiro 0x23 e o segundo 0x5C, através do pino ADDR, para que na mesma entrada seja possível conectar dois sensores e assim fazer duas leituras simultâneas e independentes. Para que isso fosse possível, a programação usada foi retirada de um site colaborativo de programação (Ewald, 2022), tornando possível a utilização de dois sensores BH1750 simultaneamente; ajustar o intervalo de leitura através da variável "measuringTimeFactor" para 0.45 Lux; e permitir que o pico de leitura atinja até 121557 Lux, gerando leituras mais realistas a céu aberto (Anexo B).

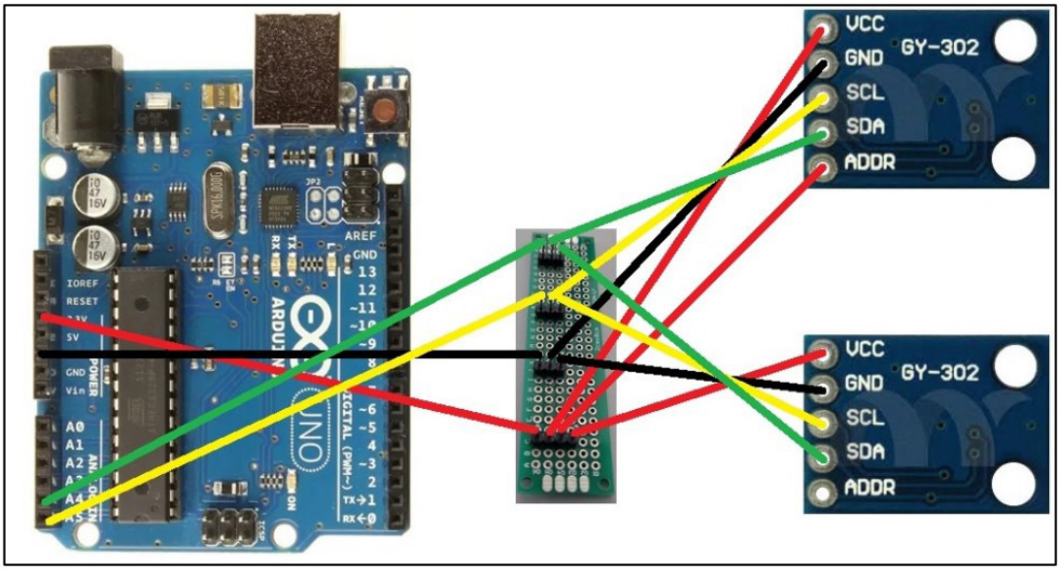


Figura 5. Esquema de ligação de dois sensores de luz BH1750 em um Arduino Uno.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a experiência adquirida durante o projeto, é possível afirmar que a falta de instrumentação disponível na área comercial não é necessariamente um fator inteiramente limitante. Apesar de a agricultura de precisão ser muito mais do que a existência de equipamentos, estes auxiliam sobremaneira no trabalho de coleta de dados e não devem ser descartados, caso haja condições de obtê-los de maneira simples e barata, mas confiável e funcional. A experiência do "Faça você mesmo" na fruticultura de precisão tem demonstrado que esta é uma prática útil e de grande valor, até que o mercado possa oferecer a demanda de sensores e equipamentos que o setor produtivo exige.

REFERÊNCIAS

ARMANI, G.; GALVANI, E. Avaliação do desempenho de um abrigo meteorológico de baixo custo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 14, n. 1, p. 116-122, 2006.

BANZI, M; SHILOH, M. **Primeiros passos com o Arduino**. São Paulo: Novatec, 2011.

EWALD, W. **BH1750FVI (GY-30, 302) ambient light sensor**. 2022. Disponível em: https://wolles-elektronikkiste.de/en/bh1750fvi-gy-30-302-ambient-light-sensor. Acesso em: 25 maio 2022.

GEBLER, S. Do-It-Yourself: constructing, repairing and maintaining domestic masculinity. **American Quarterly**, v. 49, n. 1, p. 66-112, 1997. DOI: http://doi.org/10.1353/aq.1997.0007.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Sobre meteorologia**. 2024. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/sobre-meteorologia. Acesso em: 25 abr. 2024.

LEITE JUNIOR, M. J. **Protótipo de microestação meteorológica de baixo custo para monitoramento de variáveis microclimáticas**. 2022. 66 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

KRISHNAMURTHI, K.; THAPA, S.; KOTHARI, L.; PRAKASH, A. Arduino based weather monitoring system. **International Journal of Engineering Research and General Science**, v. 3, n. 2, p. 452-458, 2015.

MICHAEL, P. **A conversion guide:** solar irradiance and lux iluminance. IEEE Dataport; 2019. DOI: http://doi.org/10.21227/mxr7-p365.

MINTEL. **DIY Review 2005**. Mintel International Group Ltd, 2005.

MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos Cultivos:** o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília, DF: INMET, 2009.

PAULA, R. C. M.; SILVA A. G.; COSTA E.; BINOTTI F. F. S. Monitoramento de variáveis micrometeorológicas em diferentes ambientes protegidos no período de inverno. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, p. 103-109, 2017. DOI: http://doi.org/10.32404/rean.v4i5.2210.

PEARCE, J. M. Building research equipment with free, open-source hardware. **Science**, v. 337, n. 6100, p. 1303-1304, 2012.

VIANNA, L. F. D. N.; PANDOLFO, C.; BLAINSKI, É.; VIEIRA, H. J. Avaliação da distribuição espacial das estações de observação climática de superfície de Santa Catarina ativas em 2020, segundo as orientações da organização mundial de meteorologia (OMM). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 3, p. 457-469, 2021. DOI: http://doi.org/10.1590/0102-7786363001021.

```
// --- Bibliotecas ---
#include <Arduino.h>
#include <Wire.h>
#include <BH1750.h> // Luminosidade
#include <RTClib.h> // Relógio em Tempo Real (RTC)
#include <SPI.h> // Módulo e Cartão SD
#include <SD.h> // Módulo de Cartão SD
#include <DHT.h> // DHT22
BH1750 lightMeter (0x5c); // Endereço I2C do Sensor de Luminosidade
// --- Variáveis do Sensor de Índice UV ---
int pino_sensor = A1; // Pino referente ao Sensor UV
int valor_sensor = 0; // Valor referente ao Sensor UV
String UV_index = "0"; // Armazena o valor do Índice UV
// --- Variáveis do Sensor de Molhamento ---
int pino_d = 6; // Pino conectado ao Sensor de Molhamento
int pino_a = A2; // Pino conectado ao Sensor de Molhamento
int val_d = 0; // Armazena o valor lido do pino digital do Sensor de Molhamento
int val_a = 0; // Armazena o valor lido do pino analógico do Sensor de Molhamento
// --- Variáveis do Sensor de Umidade e Temperatura ---
#define DHTPIN 7 // Pino conectado ao sensor DHT
#define DHTTYPE DHT22 // Tipo de sensor DHT (DHTWW)
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
// --- Variáveis do Sensor de Umidade do Solo ---
#define L1 20 //
#define L2 40 //
#define L3 60 //
#define L4 80 //
#define L5 100 //
#define analogi A0 //
#define digital 11 //
#define gnd_pin 10 //
#define vcc_pin 9 //
void read_humidity(int level1, int level2, int level3, int level4, int level5);
int adc_value = 0x00;
const int chipSelect = 10;
// --- Variáveis do Módulo de Cartão SD e RTC ---
File myFile; // Cria um arquivo para armazenar os dados
RTC_DS1307 rtc; // RTC
void setup() {
pinMode(pino_sensor, INPUT); // Chama o pino do sensor UV
Serial.begin(9600);
Serial.println(F("Iniciando os sensores..."));
pinMode(analogi, INPUT);
pinMode(digital, INPUT);
pinMode(gnd_pin, OUTPUT);
pinMode(vcc_pin, OUTPUT);
digitalWrite(gnd_pin, LOW);
digitalWrite(vcc_pin, HIGH);
pinMode(pino_d, INPUT); // Referente ao sensor de molhamento
pinMode(pino_a, INPUT); // Referente ao sensor de molhamento
Wire.begin();
lightMeter.begin();
dht.begin();
// --- Configuração do RTC ---
if (! rtc.begin()) {
Serial.println("Não foi possível encontrar o RTC");
while (1);
}
else {
rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__))); // Define a hora a partir da compilação do sketch
}
if (! rtc.isrunning()) {
Serial.println("RTC não está funcionando!");
}
// --- Configuração do Módulo de Cartão SD ---
Serial.print("Inicializando cartão SD... ");
if (!SD.begin(chipSelect)) {
Serial.println("Falha na inicialização!");
return;
}
Serial.println("Inicialização OK.");
myFile = SD.open("DATA.txt", FILE_WRITE);
if (myFile) {
Serial.println("Arquivo 'DADOS.TXT' aberto com sucesso!");
// myFile.println("Data;Hora;Temperatura;Umidade;Umidade_do_Solo;Indice_UV;Luminosidade"); }
myFile.close();
}
// --- Gravação dos dados do RTC no Cartão SD ---
void loggingTime() {
DateTime now = rtc.now();
myFile = SD.open("DATA.txt", FILE_WRITE);
if (myFile) {
myFile.print(now.day(), DEC);
myFile.print('/');
myFile.print(now.month(), DEC);
myFile.print('/');
myFile.print(now.year(), DEC);
myFile.print(';');
```

```
  myFile.print(now.hour(), DEC);
  myFile.print(':');
  myFile.print(now.minute(), DEC);
  myFile.print(':');
  myFile.print(now.second(), DEC);
  myFile.print(";");
  }
  Serial.print(now.day(), DEC);
  Serial.print('/');
  Serial.print(now.month(), DEC);
  Serial.print('/');
  Serial.print(now.year(), DEC);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(now.hour(), DEC);
  Serial.print(':');
  Serial.print(now.minute(), DEC);
  Serial.print(':');
  Serial.print(now.second(), DEC);
  Serial.print(" ");
  myFile.close();
  }
  void loggingTemperature() {
  float t = dht.readTemperature();
  float h = dht.readHumidity();
  uint16_t lux = lightMeter.readLightLevel();
  if (isnan(h) || isnan(t) ) {
  Serial.println("Falha na leitura do sensor DHT!");
  return;
  }
  // --- Gravação dos dados dos sensores no Cartão
SD ---
  myFile = SD.open("DATA.txt", FILE_WRITE);
  if (myFile) {
  myFile.print(t); // Temperatura
  myFile.print(";");
  myFile.print(h); // Umidade
  myFile.print(";");
  myFile.print(adc_value); // Umidade do solo
  myFile.print(";");
  myFile.print(UV_index); // Índice UV
  myFile.print(";");
  myFile.println(lux); // Luminosidade
  }
  myFile.close();
  }
  void loop() {
  loggingTime();
  loggingTemperature();
  // (2000);
  uint16_t lux = lightMeter.readLightLevel(); // Lê os
valores do sensor de luminosidade
  read_humidity(L1, L2, L3, L4, L5); // Função que lê
Sensor de Umidade do Solo
  // --- Configuração do Sensor de Radiação Ultravioleta
(UV) ---
  valor_sensor = analogRead(pino_sensor);
  int tensao = (valor_sensor * (5.0 / 1023.0)) * 1000;
// Calcula tensão em milivolts
  // Compara com valores tabela de Índice UV
  if (tensao > 0 && tensao < 50)
  {
  UV_index = "0";
  }
  else if (tensao > 50 && tensao <= 227)
  {
  UV_index = "0";
  }
  else if (tensao > 227 && tensao <= 318)
  {
  UV_index = "1";
  }
  else if (tensao > 318 && tensao <= 408)
  {
  UV_index = "2";
  }
  else if (tensao > 408 && tensao <= 503)
  {
  UV_index = "3";
  }
  else if (tensao > 503 && tensao <= 606)
  {
  UV_index = "4";
  }
  else if (tensao > 606 && tensao <= 696)
  {
  UV_index = "5";
  }
  else if (tensao > 696 && tensao <= 795)
  {
  UV_index = "6";
  }
  else if (tensao > 795 && tensao <= 881)
  {
  UV_index = "7";
  }
  else if (tensao > 881 && tensao <= 976)
  {
  UV_index = "8";
  }
  else if (tensao > 976 && tensao <= 1079)
  {
  UV_index = "9";
  }
  else if (tensao > 1079 && tensao <= 1170)
  {
  UV_index = "10";
```

```
    }
    else if (tensao > 1170)
    {
    UV_index = “11”;
    }
    // --- Configuração do Sensor de Temperatura e
Umidade ---
    delay(2000); // No mínimo 2000 milissegundos
para iniciar o DHT22
    float h = dht.readHumidity();
    float t = dht.readTemperature();
    float f = dht.readTemperature(true);
    if (isnan(h) || isnan(t) || isnan(f)) {
    Serial.println(F(“Falha na leitura do sensor DHT”));
    return;
    }
    // --- Informações apresentadas no Monitor Serial ---
    Serial.print(F(“Temperatura: “));
    Serial.print(t);
    Serial.print(F(“°C “));
    Serial.print(F(“Umidade do ar: “));
    Serial.print(h);
    Serial.print(F(“% “));P
    Serial.print(“Umidade do solo: “);
    Serial.print(adc_value);
    Serial.print(“% “);
    Serial.print(“Índice UV: “);
    Serial.print(UV_index);
    Serial.print(“ Luminosidade: “);
    Serial.print(lux);
    Serial.print(“ Lux “);
    // --- Configuração do Sensor de Molhamento ---
    val_d = digitalRead(pino_d); // Lê e armazena o va-
lor do pino digital do sensor de chuva
    val_a = analogRead(pino_a); // Lê e armazena o va-
lor do pino analógico do sensor de chuva
    // Serial.print(“Valor analogico: “); // Envia as in-
formações do sensor de molhamento MS
    // Serial.print(val_a); // Envia as informações do
valor sensor de molhamento para o MS
    if (val_a > 600 && val_a < 1024) {
    Serial.println(“ Planta seca”);
    }
    if (val_a > 400 && val_a < 600) {
    Serial.println(“ Planta moderadamente molhada”);
    }
    if (val_a > 0 && val_a < 400) {
    Serial.println(“ Planta molhada”);
    }
    // delay(0000);
    }
    void read_humidity(int level1, int level2, int level3,
int level4, int level5)
    {
    adc_value = map(analogRead(analogi), 1023, 0, 0,
100); // Lê valor do sinal analógico em %
    }
    // --- FIM DO CÓDIGO ---
```

```
#include <Wire.h>
#include <BH1750_WE.h>
#include <DHT.h>; //INCLUSÃO DE BIBLIOTECA
// RTC
#include <Arduino.h>
#include "RTClib.h"
#include <SPI.h> // Módulo e Cartão SD
#include <SD.h> // Módulo de Cartão SD
RTC_DS1307 RTC;
const int chipSelect = 10;
// --- Variáveis do Módulo de Cartão SD e RTC ---
File myFile; // Cria um arquivo para armazenar os dados
//RTC_DS1307 rtc; // RTC
#define BH1750_ADDRESS 0x23
#define DHTPIN 2 //PINO DIGITAL UTILIZADO PELO DHT22
#define DHTTYPE DHT22 //DEFINE O MODELO DO SENSOR (DHT22 / AM2302)
DHT dht(DHTPIN,DHTTYPE);//PASSA OS PARÂMETROS PARA A FUNÇÃO
BH1750_WE myBH1750(BH1750_ADDRESS);
// You may also pass a TwoWire object like wire2
//BH1750_WE myBH1750(&wire2, BH1750_ADDRESS);
//Variables
int chk;
float hum; //Stores humidity value
float temp; //Stores temperature value
void setup() {
Serial.begin(9600);
Wire.begin();
myBH1750.init(); // sets default values: mode = CHM, measuring time factor = 1.0
// myBH1750.setMode(CLM); // uncomment if you want to change default values
myBH1750.setMeasuringTimeFactor(0.45); // uncomment for selection of value between 0.45 and 3.68
dht.begin(); //INICIALIZA A FUNÇÃO
delay(2000); //INTERVALO DE 2 SEGUNDO ANTES DE INICIAR
Serial.println(F("Iniciando os sensores..."));
RTC.begin();
if (! RTC.isrunning())
{
RTC.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));
Serial.println("RTC is NOT running!");
}
// --- Configuração do Módulo de Cartão SD ---
Serial.print("Inicializando cartão SD... ");
if (!SD.begin(chipSelect)) {
Serial.println("Falha na inicialização!");
return;
}
Serial.println("Inicialização OK.");
myFile = SD.open("DATA.txt", FILE_WRITE);
if (myFile) {
Serial.println("Arquivo 'DADOS.TXT' aberto com sucesso!");
// myFile.println("Data;Hora;Temperatura"); // Cabeçalho dos dados
}
myFile.close();
}
void loop() {
float lightIntensity = myBH1750.getLux();
// Sensor readings may also be up to 2 seconds 'old' (its a very slow sensor)
float h = dht.readHumidity();
// Read temperature as Celsius (the default)
float t = dht.readTemperature();
delay(2000); //INTERVALO DE 2 SEGUNDOS * NÃO DIMINUIR ESSE VALOR
// Compute heat index in Celsius (isFahreheit = false)
float hic = dht.computeHeatIndex(t, h, false);
DateTime now = RTC.now();
Serial.print(now.day(), DEC);
Serial.print('/');
Serial.print(now.month(), DEC);
Serial.print('/');
Serial.print(now.year(), DEC);
Serial.print(' ');
Serial.print(now.hour(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.print(now.minute(), DEC);
Serial.print(':');
Serial.print(now.second(), DEC);
Serial.print(F(" Luminosidade: "));
Serial.print(lightIntensity);
Serial.print(F(" Lux "));
Serial.print(F(" UR: "));
Serial.print(h);
Serial.print(F(" % Temperatura: "));
Serial.print(t);
Serial.println(F(" °C "));
// --- Gravação dos dados dos sensores no Cartão SD ---
myFile = SD.open("DATA.txt", FILE_WRITE);
if (myFile) {
DateTime now = RTC.now();
myFile.print(now.day(), DEC);
myFile.print('/');
myFile.print(now.month(), DEC);
myFile.print('/');
```

```
myFile.print(now.year(), DEC);
myFile.print(‘ ‘);
myFile.print(now.hour(), DEC);
myFile.print(‘:’);
myFile.print(now.minute(), DEC);
myFile.print(‘:’);
myFile.print(now.second(), DEC);
myFile.print(“ “);
myFile.print(“ Luminosidade: “);
myFile.print(lightIntensity);
myFile.print(“ LUX “);
myFile.print(“;”);
myFile.print( “ UR: “);
myFile.print(h);
myFile.print(“;”);
myFile.print(“% Temperatura: “);
myFile.print(t);
myFile.println(“ °C “);
}
myFile.close();
}
```

Planejamento e avaliação de sistemas de terraceamento utilizando imagens aéreas e ferramentas digitais

13

Planning and evaluation of terracing systems using aerial images and digital tools

Julio Cezar Franchini dos Santos[1], Esmael Lopes dos Santos[2], Henrique Debiasi[3], Rafael Herrig Furlanetto[4], Anderson Sartori[5], Tiago Cyrino Carrashi[6], Alvadi Antonio Balbinot Junior[7]

[1] *Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, julio.franchini@embrapa.br*
[2] *Professor, Centro Universitário FAG, Cascavel (PR), Brasil, elsantos@fag.edu.br*
[3] *Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, henrique.debiasi@embrapa.br*
[4] *Engenheiro Agrônomo, Cocamar, Maringa (PR), Brasil, rafael.furlanetto@cocamar.com.br*
[5] *Engenheiro Agrônomo, Bolsista de Inovação Embrapa Soja/Itaipu/Faped, Londrina (PR), Brasil, sartori80@gmail.com*
[6] *Engenheiro Agrônomo, Bolsista de Inovação Embrapa Soja/Itaipu/Faped, Londrina (PR), Brasil, tiago_carraschi@hotmail.com*
[7] *Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, alvadi.balbinot@embrapa.br*

RESUMO

A erosão do solo é um importante problema ambiental e é fortemente afetada pela qualidade da estrutura do solo em sistemas de produção agrícola. A taxa de infiltração de água no solo (TIE) é uma variável complexa que integra outras variáveis associadas à estrutura do solo e tem influência direta na determinação da lâmina de escoamento superficial (LES), informação básica para o dimensionamento de terraços. A topografia do terreno e algumas variáveis derivadas, como a declividade e o comprimento de rampa, também são importantes para definir o sistema de terraceamento e podem ser extraídas do modelo digital de elevação (MDE) obtido por meio de imagens aéreas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade do sistema de terraceamento implantado em talhões de produção agrícola usando o MDE, a TIE e um software gratuito de dimensionamento de terraços. O software trabalhou com as seguintes entradas de dados: intensidade da chuva, período de retorno, tipo de terraço, altura do terraço, TIE, altimetria e declividade do talhão. O software permitiu simular a configuração de terraços que mais bem se ajustou aos terraços implantados nos talhões. A TIE medida foi utilizada para avaliar se os terraços eram adequados às características dos talhões. A metodologia utilizada demonstrou que a capacidade de retenção da LES está relacionada com a qualidade estrutural do solo, representada pela TIE. A diversificação de espécies no sistema de produção contribui para aumentar a TIE, tornando mais eficientes os sistemas de terraceamento. Desta forma, o manejo do sistema de produção assume uma importância bem maior para o controle do processo erosivo do que a que vem sendo considerada, em detrimento das dimensões e quantidade de terraços. A utilização de imagens aéreas e de softwares de processamento e planejamento é contribuição importante da agricultura digital para o aprimoramento do processo de alocação e avaliação dos sistemas de terraceamento.

Palavras-chave: conservação de solo; modelo digital de elevação; taxa de infiltração estável.

ABSTRACT

Soil erosion is an important environmental problem and is strongly affected by soil structure quality in agricultural systems. The water infiltration rate (WIR) into the soil is a complex variable that integrates other variables associated with the soil structure and has a direct influence on the determination of the surface runoff (SR), basic information for terraces design. The terrain topography and some derived variables such as slope and slope length are also important to define the terracing system and can be extracted from the digital elevation model (DEM) obtained through aerial images. This work aimed to evaluate the quality of the terracing system implemented in agricultural plots using the DEM, the WIR and free software for terrace design. The software provided the following data inputs: rainfall intensity, return period, terrace type, terrace height, WIR, altimetry and slope of the field. The software made it possible to simulate the terrace configuration that best suited the terraces planted on the

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000077

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

plots. The measured WIR was used to assess whether the terraces were suitable for plot characteristics. The methodology used showed that the retention capacity of SR is related to the structural quality of the soil, represented by the WIR. The diversification of species in the production system helps to increase the WIR, making terracing systems more efficient. In this way, the management of the production system assumes a much greater importance in controlling the erosion process than what has been considered, to the detriment of the sizes and quantity of terraces. The use of aerial images and processing and planning software are important contributions of digital agriculture to improving the process of allocating and evaluating terracing systems.

Keywords: soil conservation; digital elevation model; stable infiltration rate.

1 INTRODUÇÃO

A erosão é um fenômeno natural que depende da interação de vários fatores, como: a erosividade da chuva, a erodibilidade do solo, a declividade, o comprimento de rampa, a taxa de infiltração de água no solo e as práticas de manejo e de conservação do solo e da água. A conservação do solo e da água na propriedade rural é um dos princípios básicos para a sustentabilidade econômica e ambiental da produção agrícola (Didone et al., 2015). O manejo inadequado do sistema de produção pode influenciar diretamente nas perdas de solo e da água, devido ao aumento da lâmina de escoamento superficial, que é o excedente de água da chuva que não infiltra. O terraceamento é uma prática conservacionista bem difundida entre os agricultores para o ordenamento e controle do fluxo superficial de água, sendo essencial para a prevenção e o controle da erosão hídrica. No entanto, nos últimos anos, ele tem sido questionado em função do número considerado excessivo de terraços alocados considerando os critérios atuais utilizados no Paraná (Caviglione et al., 2010).

Identificar a variação espacial e temporal para melhor aplicação das práticas agrícolas e aproveitamento dos insumos é uma das premissas da agricultura de precisão, que busca com isso melhorar a produtividade, reduzir o custo de produção e os impactos ambientais (Jorge; Inamasu, 2014). O monitoramento de áreas agrícolas pode ser realizado por meio de veículos aéreos não tripulados (VANTs), popularmente conhecidos como drones, e permite a obtenção de imagens aéreas de grandes áreas com baixo custo, com maior frequência e com alta resolução (Franchini et al., 2018). Além de monitorar o comportamento das culturas, as imagens aéreas também permitem obter o modelo digital de elevação (MDE) da área. O MDE permite a construção de bases precisas de altimetria e declividade, facilitando o trabalho de planejamento do sistema de terraceamento. Outra informação importante para o planejamento de terraços é a taxa de infiltração estável de água no solo (TIE), uma vez que afeta diretamente a lâmina de escoamento superficial de água (LES) utilizada para o dimensionamento de terraços. A TIE é influenciada pela qualidade da estrutura do solo, que por sua vez está fortemente relacionada com o nível de diversificação de espécies vegetais no sistema de produção (Silva et al., 2018). O software Terraço 4.1 foi desenvolvido para o planejamento integrado dos recursos hídricos e é aplicado na conservação do solo e da água (Pruski et al., 2022). O software permite realizar simulações usando informações sobre a erosividade da chuva, período de retorno da chuva, dados de altimetria e declividade do terreno, a forma de construção e dimensões das estruturas de contenção da enxurrada e a TIE. Esse conjunto de informações permite realizar análises criteriosas das características locais, o que resulta em mais opções para o dimensionamento do sistema de terraceamento a ser utilizado, facilitando a tomada de decisão de técnicos e produtores rurais (Cunha et al., 2011).

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar os sistemas de terraceamento implantados em áreas agrícolas com diferentes históricos do sistema de produção, na região norte e noroeste do Paraná, por meio da TIE e de ferramentas digitais para a obtenção do MDE e simulação de terraços.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido durante a safra 2019/2020, em dez talhões de propriedades agrícolas com diferentes históricos de manejo do sistema de produção, localizadas nas regiões norte e noroeste do Paraná (Tabela 1). Em cada área foram estabelecidos oito pontos amostrais, distribuídos no terço médio do talhão, para avaliação da textura e da TIE (mm h^{-1}). As áreas avaliadas foram selecionadas em propriedades de cooperados da Cocamar Cooperativa Agroindustrial. Para a classificação textural das amostras foram utilizados os níveis estabelecidos por Santos et al. (2013), conforme apresentado na Tabela 1.

A TIE foi determinada com auxílio de um infiltrômetro construído conforme as especificações descritas por Ogden et al. (1997) e aperfeiçoadas por Serrato et al. (2019). Para as medidas, o reservatório

de água do infiltrômetro era posicionado sobre um cilindro metálico com diâmetro de 24 cm e altura de 15 cm, previamente inserido a uma profundidade de 5 cm. O volume de chuva aplicado era determinado por meio de um sistema que permite a regulagem da entrada de ar no sistema. Para determinar a TIE, foi simulada uma chuva com intensidade de aproximadamente 300 mm h^{-1}. O escoamento superficial foi determinado a partir do volume de água coletado por uma mangueira posicionada em um orifício de 1 cm^2 localizado ao nível do solo na parte externa do cilindro. A TIE foi obtida pela diferença entre o volume de chuva aplicado e o volume de água escoado superficialmente. As leituras do volume de água no reservatório (intensidade de chuva) e de água escoada superficialmente foram realizadas a intervalos de 3 minutos. As avaliações se prolongaram até a estabilização das leituras de escoamento, o que durou em média 60 minutos por ponto.

As imagens aéreas foram obtidas com um VANT do tipo quadricóptero (Phantom 4 Pro®) com câmera com sensor RGB (bandas: red, green e blue), quando a cultura da soja estava entre os estádios fenológicos R_3 e R_5 (Figura 1 A). O plano de voo foi previamente definido no aplicativo Pix4D® capture (PIX4D, 2020), na altitude de 120 m e 75% de sobreposição longitudinal e 55% lateral (Figura 1B). As imagens geradas foram processadas por meio do software Agisoft Metashape v. 1.5.5 (Agisoft, 2019), gerando ao final do processo o ortomosaico e o modelo digital de elevação (MDE).

Não foram utilizados pontos de controle georreferenciados no solo para correção de distorções nas imagens geradas. Para a construção da base de dados de altimetria e declividade a partir do MDE, empregou-se uma série de procedimentos utilizando os softwares QGIS (QGIS, 2022) e VESPER (Minasny et al., 2006) (Figura 2A e 2B). Em resumo, a resolução do MDE foi reduzida de aproximadamente 10 cm para

Tabela 1. Localização, históricos de manejo do sistema de produção, textura do solo (camada 0-20 cm) e área dos talhões agrícolas avaliados na safra 2019/20 nas regiões norte e noroeste do Paraná.

Talhão	Município	Histórico de manejo	Textura (0-20 cm)	Área (ha)
1	Bela Vista do Paraíso	Soja/milho + Urochloa sp. (4 safras)	Argiloso	36,5
2	Iporã	Soja/Urochloa sp. solteira (> 5 safras)	Arenoso	10,6
3	Maringá	Soja/trigo - Soja/milho + Urochloa sp. (2 safras)	Muito argiloso	43,1
4	Apucarana	Soja/trigo	Muito argiloso	36,6
5	Cianorte	Soja/Urochloa sp. solteira (2 safras)	Arenoso	16,4
6	Santa Mariana	Soja/milho	Muito argiloso	13,6
7	Cafezal do Sul	Pasto-soja/Urochloa sp. solteira (1 safra)	Arenoso	34,5
8	Jussara	Soja/milho	Média	52,3
9	Jussara	Cana/soja (1 safra)	Muito argiloso	36,2
10	Cianorte	Soja/milho	Média	16,9

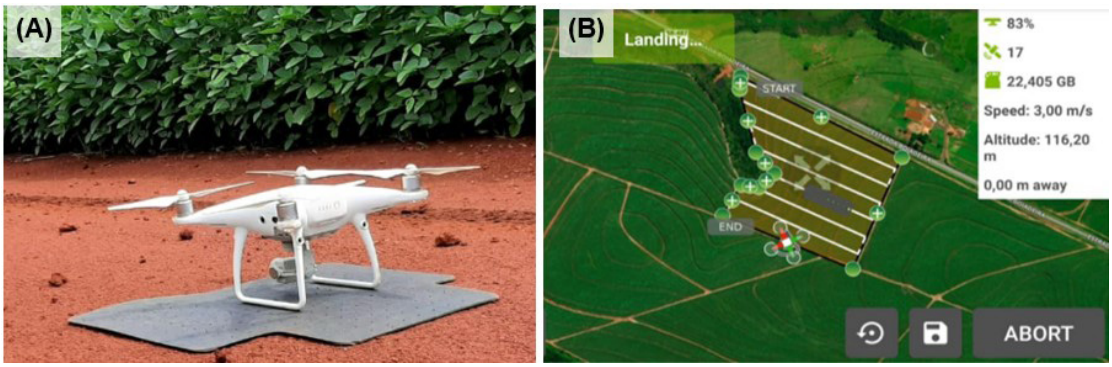


Figura 1. Quadricóptero (Phantom 4 Pro®, DJI®) utilizado para obtenção das imagens (A); Plano de voo elaborado no software Pix4D® capture (B).

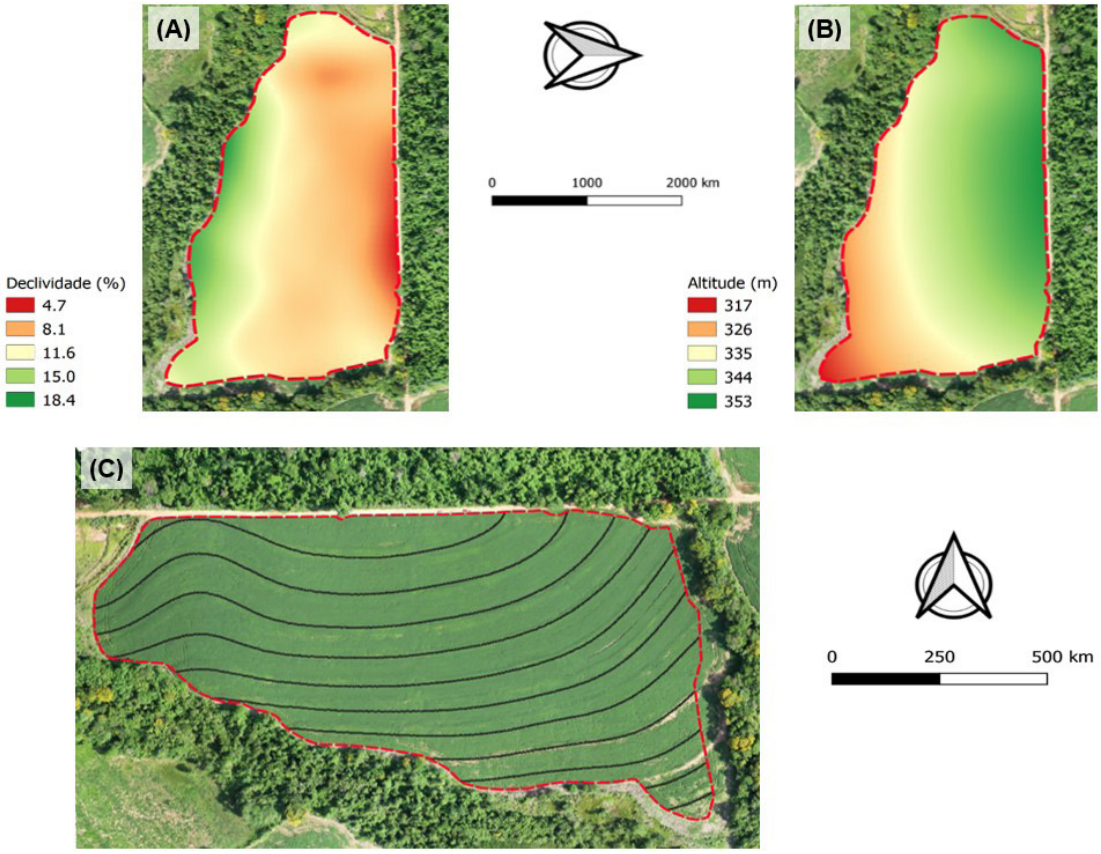


Figura 2. Declividade (A), altimetria (B) e configuração dos terraços projetados e alocados no talhão (C).

20 m no QGIS e remodelada por meio de geoestatística no VESPER. Os dados krigados foram retornados ao QGIS para o cálculo da declividade. Os dados de declividade também foram remodelados no VESPER, seguindo o mesmo procedimento utilizado para a altimetria. O modelo mais bem ajustado à altitude e à declividade foi o gaussiano, com distância máxima de 200 m e número de lags variando entre 5 e 9, de acordo com as características das áreas. Para seleção do modelo e dos parâmetros foram utilizados os menores valores do índice AIC e da raiz quadrada do desvio padrão (RMSE), indicadas no VESPER. As bases de dados finais para uso no software Terraço 4.1 foram geradas no software QGIS, a partir dos dados krigados. As bases foram geradas com resolução de 1 m e exportadas no formato ASCII GRID, que permite a leitura diretamente no software Terraço 4.1.

No software Terraço 4.1 foram padronizados alguns parâmetros para a avaliação da eficiência dos sistemas de terraceamento em cada área agrícola. Foram utilizados os parâmetros de erosividade da chuva para a sede do município onde as propriedades estavam localizadas. O tempo de retorno da chuva do projeto foi estabelecido como sendo de 15 anos. Esses parâmetros determinam a quantidade de chuva (lâmina em mm/24h) considerada para o cálculo da quantidade e dimensão dos terraços. Para todas as áreas agrícolas avaliadas, os parâmetros de declividade permitiram a construção de terraços de base larga. Desse modo, foi considerada a construção de terraços de base larga em nível com trator tracionando terraceador e coeficiente de uniformidade igual a 1. Foi utilizado o modo de espaçamento de terraços arbitrado, onde a altura do terraço é variável nos projetos de simulação. A TIE também foi considerada como variável nos projetos de simulação. A TIE tem relação direta com a lâmina de escoamento superficial (LES), e esta impacta no dimensionamento dos terraços de base larga por meio de sua altura. Desse modo, com o objetivo de encontrar a combinação entre a TIE e a altura de terraço que melhor refletia o sistema de terraceamento implantado nas áreas agrícolas, foram gerados projetos variando a altura (35, 40, 45, 50 e 55 cm) e a TIE (30, 40, 50 e 60 mm h^{-1}). Os projetos gerados na forma de vetor contendo as cotas dos terraços foram exportados do Terraço 4.1 no formato de textos (x, y, z) e carregados no software QGIS, utilizando a aba de adição de camada de texto delimitado. Por inspeção visual da sobreposição dos terraços às imagens dos ortomosaicos dos talhões, foi selecionado o pro-

jeto que mais bem se ajustava aos terraços existentes na área (Figura 2C).

Finalmente foram comparadas à TIE observada por medida direta e a TIE calculada nos projetos simulados para verificar se os sistemas implantados nos talhões agrícolas avaliados eram adequados. Quando a TIE observada foi igual ou superior à TIE determinada no projeto o sistema de terraceamento foi considerado adequado, caso contrário foi considerado inadequado.

3 RESULTADOS

A TIE, em mm h^{-1}, avaliada nas dez áreas agrícolas (Tabela 2) foi classificada em baixa (< 30; 1 área), média (30-60; 7 áreas) e alta (60-90; 2 áreas), conforme escala proposta por Silva et al. (2018). Os resultados apresentados indicam que o nível de diversificação de culturas no outono/inverno, quando comparado com o sistema de referência mais tradicional na região do estudo, com soja no verão e milho 2ª safra esteve relacionado de forma positiva com a TIE. Sistemas mais diversificados, com a introdução de *Urochloa ruziziensis* solteira ou em consórcio com o milho 2ª safra, por mais do que um ano, proporcionam maior aporte de biomassa de parte aérea e raízes das plantas no sistema, o que contribuiu para diminuir o impacto direto das gotas na superfície (palhada) e aumentar a quantidade de poros contínuos (raízes) que favorecem a infiltração e o armazenamento de água. O aumento da TIE reduz a LES, o que pode contribuir para o funcionamento mais bem adequado dos sistemas de terraceamento implantados nos talhões agrícolas, evitando o transbordamento.

As simulações no software Terraço 4.1, variando a altura dos terraços de base larga e a TIE, permitiram identificar a combinação que mais bem se ajustava ao posicionamento do sistema de terraceamento implantado nos talhões agrícolas avaliados, conforme apresentado na Tabela 2 e Figura 2C. A TIE calculada para os sistemas projetados ficou dentro da faixa de nível médio (entre 30 e 60 mm h^{-1}), enquanto a altura variou entre 40 cm e 55 cm. A TIE observada, devido a sua relação direta com a LES, foi utilizada como referência para avaliação relativa dos sistemas de terraceamento implantados. Nesse sentido, apenas em quatro talhões a TIE observada foi maior do que a TIE calculada, indicando que o sistema implantado poderia ser considerado adequado. Nos outros seis talhões, o fato da TIE observada ser menor do que a TIE calculada indica que, para os parâmetros considerados no cálculo dos sistemas de terraceamento, haveria maior probabilidade de transbordamento dos terraços do que a estabelecida para o período de retorno da chuva do projeto de 15 anos. Os talhões agrícolas onde a TIE observada foi maior do que a TIE calculada foram caracterizados pelo uso de sistemas de produção mais diversificados e por mais de um ano, demostrando a importância da diversificação para a melhoria da qualidade estrutural do solo. Segundo Pruski (2009), determinar corretamente a LES é fundamental para o dimensionamento correto da seção transversal de terraços, uma vez que quanto maior a capacidade de infiltração de água no solo menor se-

Tabela 2. Características dos terraços projetados mais bem ajustados com os terraços implantados nos talhões agrícolas avaliados, TIE observada e classificação do sistema implantado.

Talhão	Município	Calculado			TIE (mm h^{-1})	Classificação
		Altura (cm)	TIE (mm h^{-1})	Nº terraços	Observada	
1	Bela Vista do Paraíso	50	40	11	133	Adequado
2	Iporã	45	40	11	68	Adequado
3	Maringá	45	40	17	62	Adequado
4	Apucarana/PR	50	60	5	49	Inadequado
5	Cianorte	50	30	16	41	Adequado
6	Santa Mariana	50	50	6	38	Inadequado
7	Cafezal do Sul	40	40	20	36	Inadequado
8	Jussara	45	50	18	36	Inadequado
9	Jussara	55	50	8	35	Inadequado
10	Cianorte	40	40	15	20	Inadequado

rá o escoamento superficial produzido e menores podem ser as dimensões dos terraços.

O fato de os sistemas de terraceamento serem classificados como inadequados em seis talhões avaliados é preocupante, pois indica que sob condições inadequadas de manejo do solo, como compactação excessiva e cobertura do solo deficiente, existe grande probabilidade de que ocorra erosão significativa nesses talhões. No entanto, duas ações podem ser adotadas pelos produtores para correção da situação diagnosticada. A primeira seria o aumento da altura do terraço o suficiente para garantir o armazenamento da LES na TIE observada, o que envolve custos com horas de trabalho de máquinas e implementos, porém sem alterar a origem do problema, a baixa TIE. A segunda opção seria o uso de práticas de manejo do sistema de produção, baseadas na diversificação de espécies, por período maior do que um ano, como as observadas nos outros quatro talhões avaliados considerados adequados, que promovam o aumento da TIE observada. Assim, haveria redução da LES e o sistema de terraceamento implantado passaria a ser considerado adequado.

A metodologia utilizada no estudo contribuiu para o entendimento de que o funcionamento do sistema de terraceamento implantado nos talhões está intimamente relacionado com a qualidade estrutural do solo, representada pela TIE. Desta forma, o manejo do sistema de produção assume uma importância bem maior para o controle do processo erosivo do que a que vem sendo considerada em detrimento das meras dimensões físicas dos terraços. A metodologia pode ser melhorada pelo uso de pontos de controle georreferenciados que permitiriam medir a altura dos terraços.

4 CONCLUSÕES

A utilização de imagens aéreas e de softwares de processamento e planejamento aprimora o processo de alocação e avaliação dos sistemas de terraceamento. A diversificação de espécies no sistema de produção contribui para aumentar a taxa de infiltração de água no solo, tornando mais eficientes os sistemas de terraceamento.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho utilizou recursos do projeto SoloVivo – "Aprimoramento de Processos para a Qualificação do Manejo de Terras no Centro-Sul do Brasil" (convênio Embrapa-Itaipu Binacional No. 0212120040001).

REFERÊNCIAS

AGISOFT METASHAPE 1.5.5, Software, 2019. https://www.agisoft.com/downloads/installer/

CAVIGLIONE, J. H.; FIDALSKI, J.; ARAUJO, A. G.; BARBOSA, G. M. C.; LLANILLO, R. F.; SOUTO, A. R. **Espaçamento entre terraços em plantio direto**. Londrina: IAPAR, 2010 (Boletim Técnico 71).

CUNHA, F. F.; LEAL, A. J. F; ROQUE, C. G. Planejamento de sistemas de terraceamento utilizando o software Terraço 3.0. Brazilian Geographical Journal: **Geosciences and Humanities research medium**,v. 2, n. 1, p. 182-196, 2011.

DIDONE, E. J.; MINELLA, J.P.G.; MERTEN, G.H. Quantifying soil erosion and sediment yield in a catchment in southern Brazil and implications for land conservation. **J Soils Sediments**, v. 15(11): 2334–2346, 2015.

FRANCHINI, J. C.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; JORGE, L. A. C.; DEBIASI, H.; DIAS, W. P.; GODOY, C. V.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; CORREA, F. B.; OLIVEIRA, M. C. N. **Uso de imagens aéreas obtidas com drones em sistemas de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2018. 39 p. (Embrapa Soja. Documentos, 408).

FRANCHINI, J. C.; PRUSKI, F. F.; ARAUJO, R.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; CONTE, O.; SANTOS, E. L. Avaliação do sistema de terraços após manutenção e readequação em uma fazenda na região norte do Paraná. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA, 35., Londrina, 2016. **Resumos expandidos**... Londrina: Embrapa Soja, 2016. p. 52-54. (Embrapa Soja. Documentos, 372).

JORGE, L. A. C.; INAMASU, R. Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 109-134.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. **Vesper 1.62 – spatial prediction software for precision agriculture**. Sidney: Australian Centre for Precision Agriculture (ACPA), University of Sydney, 2006.

SERRATO, C. D.; FRANCHINI, J. C.; SERRATO, F. R.; DEBIASI, H.; SANTOS, E. L.; CONTE, O.; MORALES NETO, S.; BRISCHILIARI, V. **Infiltrômetro de aspersão de Cornell aperfeiçoado: aspectos construtivos, operacionais e de manutenção**. Londrina: Embrapa Soja, 2019. 66 p. (Embrapa Soja. Documentos, 424).

OGDEN, C. B.; VAN ES, H. M.; SCHINDELBECK, R. R. Miniature rain simulator for field measurement of soil infiltration. **Soil Science Society of American Journal**, v. 61, n. 4, p. 1041-1043, 1997.

PIX4D capture. **Software**, 2020. Disponível em https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture.

PRUSKY, F. F. **Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Universidade Federal de Viçosa: Viçosa, 2009. 279p.

PRUSKI, F. F. **Terraço 4.1 - Dimensionamento e manejo de sistemas de conservação de solos e drenagem de superfície**. 2022. Disponível em http://www.gprh.ufv.br/?area=softwares.

QGIS. Geographic Information System. **Open Source Geospatial Foundation Project**, 2022. Disponível em http://qgis.org.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. B.; OLIVEIRA, J. B. **Embrapa: Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 3ª ed, Brasília, 2013. 353p.

SILVA, R. V.; SANTOS, E. L.; PEREIRA, G. S.; HASS, I. J.; FURLANETTO, R. H.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Infiltração de água no solo em diferentes sistemas de manejo na região norte do Paraná. In: JORNADA ACADÊMICA DA EMBRAPA SOJA, 13., 2018, Londrina. **Resumos expandidos**... Londrina: Embrapa Soja, 2018. p. 188-194.

14

Correlação espacial em escala de campo entre atributos de Latossolos e espectros Vis-NIR

Field-scale spatial correlation between oxisols and Vis-NIR spectra

José Francirlei de Oliveira[1], Robélio Leandro Marchão[2], Michel Brossard[3], Edemar Joaquim Corazza[4], Pedro Rodolfo Siqueira Vendrame[5] Maria de Fátima Guimarães[6]

[1] *Engenheiro Agrônomo, Instituto Agronômico do Paraná, Londrina (PR), Brasil, jfoliveira79@iapar.br*
[2] *Pesquisador, Embrapa Cerrados, Planaltina (DF), Brasil, robelio.marchao@embrapa.br*
[3] *Pesquisador, Institut de Recherche pour le Développement, Montpellier, France, michel.brossard@ird.fr*
[4] *Pesquisador, Embrapa Sede, Brasília (DF), Brasil, edemar.corazza@embrapa.br*
[5] *Professor Associado, Universidade Estadual de Londrina, Londrina (PR), Brasil, vendrame@uel.br*
[6] *Professor Associado, Universidade Estadual de Londrina, Londrina (PR), Brasil, mfatima@uel.br*

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi correlacionar espacialmente os atributos de solo com dados espectrais a partir de uma abordagem de redução do espectro a fim de construir mapas temáticos em escala de campo. Em um talhão de 375 ha, 78 amostras de solo da camada de 0,87-0,92 m foram coletadas em uma grade regular de 200 m. Os solos amostrados foram classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo ácrico (*Haplic Ferralsol*) e Latossolo Vermelho distrófico (*Rhodic Ferralsol*). Vinte e duas propriedades físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas do solo foram determinadas e os espectros do visível e do infravermelho próximo (Vis-NIR) entre 400-2.500 nm foram obtidos com um espectrômetro Vis-NIR em laboratório. As bandas espectrais utilizadas para calcular a diferença de inflexão de refletância (DIR) ficaram entre (base 1/base 2): 400-510, 730-930, 1290-1450, 1800-1950, 2000-2218 e 2218-2290 nm. Três grupos de solos foram discriminados principalmente pelos índices de intemperismo Ki e Kr e teor de argila. O teor de argila para solos com granulometria discrepante e os índices Ki e Kr para solos com granulometria homogênea modificam a intensidade da refletância e o tamanho da concavidade da banda espectral. Dessa forma, a variabilidade dos espectros foi condicionada pela variabilidade espacial das variáveis mencionadas. No entanto, a partir da redução do espetro por meio da DIR não foi possível mapear a variabilidade espacial das propriedades do solo (índice Kappa de 39%).

Palavras-chave: refletância do solo; índices Ki e Kr; variabilidade espacial do solo; Cerrado.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the potential of the reflectance inflection difference (RID) to discriminate soils and verify potential spatial correlations of the RID with soil properties, compared with the full spectra, in order to build thematic maps at field scale. On a 375ha farm , 78 soil samples from a depth of 0.87–0.92-m were collected in a regular grid of 200 m, focusing on the soil diagnostic horizon (Bw horizon). The soil samples were Latossolo Vermelho-Amarelo ácrico (Haplic Ferralsol) and Latossolo Vermelho distrófico (Rhodic Ferralsol). Twenty-two physical, chemical, mineralogical, and morphological soil properties were determined, and the Vis-NIR spectra between 400–2500 nm were measured. Considering the presence of an inflection band and its relationship with soil properties, the spectral bands used to calculate the RID were between (base 1/base 2): 400–510, 730–930, 1290–1450, 1800–1950, 2000–2218, and 2218–2290 nm. Three soil groups were discriminated mainly by the Ki and Kr indexes and clay content. The clay content for soils with discrepant particle size and the Ki and Kr indices for soils with homogeneous particle size modify the reflectance intensity and the size of the concavity of the spectral band. Thus, the variability of the spectra reflected the spatial variability of the mentioned variables. However, based on spectrum reduction using RID it was not possible to map the spatial variability of soil properties (Kappa index of 39%).

Keywords: eflectance inflection difference; Ki and Kr indexes; r soil spatial variability; Cerrado.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000089

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

A avaliação da variabilidade espacial das propriedades do solo é uma ferramenta auxiliar para definir práticas agrícolas visando ao correto manejo do solo e, consequentemente, para manter o equilíbrio entre produção e os serviços ecossistêmicos prestados pelo solo. No entanto, a determinação da variabilidade espacial do solo requer intenso trabalho de campo e laboratório, envolvendo grande investimento de recursos e tempo. Isso mostra a necessidade de ferramentas quantitativamente precisas e de baixo custo para determinar a variabilidade em escalas detalhadas (Cook et al., 1996; Ramirez-Lopez et al., 2019).

Métodos espectroscópicos têm sido utilizados para mapear solos (Bazaglia Filho et al., 2013) e suas diversas propriedades, como matéria orgânica, teor de argila, distribuição de tamanho de partículas e capacidade de troca catiônica, além de associar diversas propriedades a variáveis latentes na abordagem multivariada (Webster; Burrough, 1974; Odlare et al., 2005; Rizzo et al., 2016). Webster e Burrough (1974) ilustraram a análise discriminante como um dos melhores métodos para auxiliar no levantamento e discretização de classes de solos em campo, incluindo os limites de transição entre elas. No entanto, a discretização das classes de solo com base nos espectros não permite necessariamente identificar a existência de uma boa correlação espacial entre os espectros do solo e a distribuição espacial (Nanni et al., 2014). Além disso, erros analíticos sobre a variabilidade espacial dos solos e suas propriedades podem ser observados nos mapas temáticos obtidos a partir dos espectros, devido à falta de sobreposição entre os modelos de calibração e predição. Bazaglia Filho et al. (2013) também apontaram que a variabilidade espacial dos espectros pode não corresponder à variabilidade do solo, ressaltando que a alta complexidade física do solo e seu ambiente dificulta a delimitação e classificação das unidades de mapeamento. A relação espacial entre solo e espectro também pode ser de difícil interpretação devido à complexa inter-relação entre eles. Diferentes classes de solos podem apresentar respostas espectrais semelhantes e vice-versa, o que pode aumentar a confusão quanto aos espectros e, consequentemente, ao modelo de classificação utilizado (Vasques et al., 2014).

Haberhauer et al. (1998) propuseram uma abordagem baseada na diferença de refletância entre a linha de base e o ponto mais baixo da banda espectral para análise, conhecida como diferença de inflexão de refletância (DIR) das bandas espectrais. Nesse sentido, a DIR pode reduzir a dimensionalidade dos dados, simplificar a análise qualitativa do espectro e a construção de modelos de predição de variáveis de solo, melhorando o uso da espectroscopia na ciência do solo. Oliveira et al. (2022) avaliaram o potencial da DIR para discretizar solos. No entanto, apesar de seu potencial, esse atributo espectral precisa ser melhor avaliado visando a construção de mapas de solos e suas propriedades. Portanto, partindo da hipótese que a DIR tem potencial para auxiliar diretamente na construção de mapas de atributos do solo sem o uso de modelos de previsão, o objetivo deste trabalho foi correlacionar espacialmente os atributos de solo com dados espectrais a partir de uma abordagem de redução do espectro, a fim de construir mapas temáticos em escala de campo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma fazenda com 375 ha, localizada no município de Planaltina-GO, (15º22'S, 47º27'W, altitude 1.068 m). O clima da região é classificado como tropical úmido (Aw), com pluviosidade entre 1.500 e 2.000 mm. Os solos da fazenda foram classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo ácrico e Latossolo Vermelho distrófico. As amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0,87-0,92 m em 78 pontos distribuídos em uma grade regular de 200 m e foram coletadas em triplicata para formar uma amostra composta em cada ponto. Com base na descrição dos perfis pedológicos dos solos, essa profundidade correspondeu ao horizonte Bw dos Latossolos. Mais detalhes sobre a área de estudo podem ser obtidos de Oliveira et al. (2022). Foram avaliadas 22 propriedades físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas do solo, dentre elas densidade aparente; distribuição de tamanho de partícula; floculação de argila; umidade saturada do solo; proporção de microagregados ($\Phi_{250\text{-}1.000\,\mu m}$); carbono orgânico; saturação por bases e por alumínio (%); teores de caulinita, gibbsita, goetita e hematita; índices de intemperismo Ki e Kr; índice de vermelho; pH_{KCl} e pH_{H2O}.

Os espectros foram coletados nas amostras após peneiramento em malha de 2 mm e secas a 45º C para padronização da umidade. A refletância das amostras foi avaliada em 5 g de solo colocados em uma cubeta de quartzo com 0,05 m de diâmetro. Para isso foi utilizado o espectômetro FOSS XDS (Foss NIRSystems/Tecator Infrasoft International, LLC, Silver Spring, MD, EUA). A refletância foi determinada a cada 2 nm entre 400 e 2.500 nm, resultando em 1.051 bandas espectrais. Cada amostra foi escaneada 32 vezes e o espectro médio foi considerado como resultado. A média dos espectros das três réplicas do solo amostrado foi obtida com o software WinISI II, versão 1.50 (Foss

NIRSystems/Tecator Infrasoft International, LLC, Silver Spring, MD, EUA). A DIR foi calculada de acordo com Haberhauer et al. (1998) e Nanni e Demattê (2006), usando as seguintes bandas espectrais (base 1/base 2): 400-510, 730-930, 1.290-1.450, 1.800-1.950, 2.000-2.218 e 2.218-2.900 nm.

Foi realizada a análise discriminante (variáveis canônicas) e de agrupamentos das propriedades dos solos e a geoestatística e regressão logística multinomial para relacionar espacialmente a DIR dos espectros com essas variáveis. Informações adicionais acerca da metodologia utilizada podem ser consultadas em Oliveira et al. (2022).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de agrupamento revelou a formação de três grupos de solos, com propriedades físicas e mineralógicas significativamente diferentes a partir de duas classes de Latossolos (Figura 1a). A partir dos agrupamentos gerados, observou-se que o grupo 1, localizado ao sul, cobriu 17% (62,5 ha) do talhão estudado e apresentou menores teores de argila, ferro, alumínio, silício, hematita, goethita, gibbsita e caulinita e, consequentemente, menor proporção de microagregados $\Phi_{250\text{-}1.000\ \mu m}$ e maior densidade aparente em relação aos grupos 2 e 3. O grupo 2 cobriu 48% (182,7 ha) do talhão e apresentou maiores teores de ferro, alumínio, gibbsita e goethita; teores intermediários de argila, silício, caulinita, microagregados $\Phi_{250\text{-}1.000\ \mu m}$ e densidade aparente e menores valores dos índices Ki e Kr em relação aos grupos 1 e 3. O grupo 3 cobriu 35% (129,8 ha) do talhão e apresentou maiores teores de argila, silício, caulinita, hematita, índice Ki, índice de vermelhidão e microagregados $\Phi_{250\text{-}1.000\ \mu m}$, bem como menores teores de gibbsita, goethita e densidade aparente em comparação com os grupos 1 e 2. Para os grupos 1 e 3, a curvatura vertical do terreno foi convexa, mas, para o grupo 2, côncava, o que é um fator importante para explicar a presença de diferentes

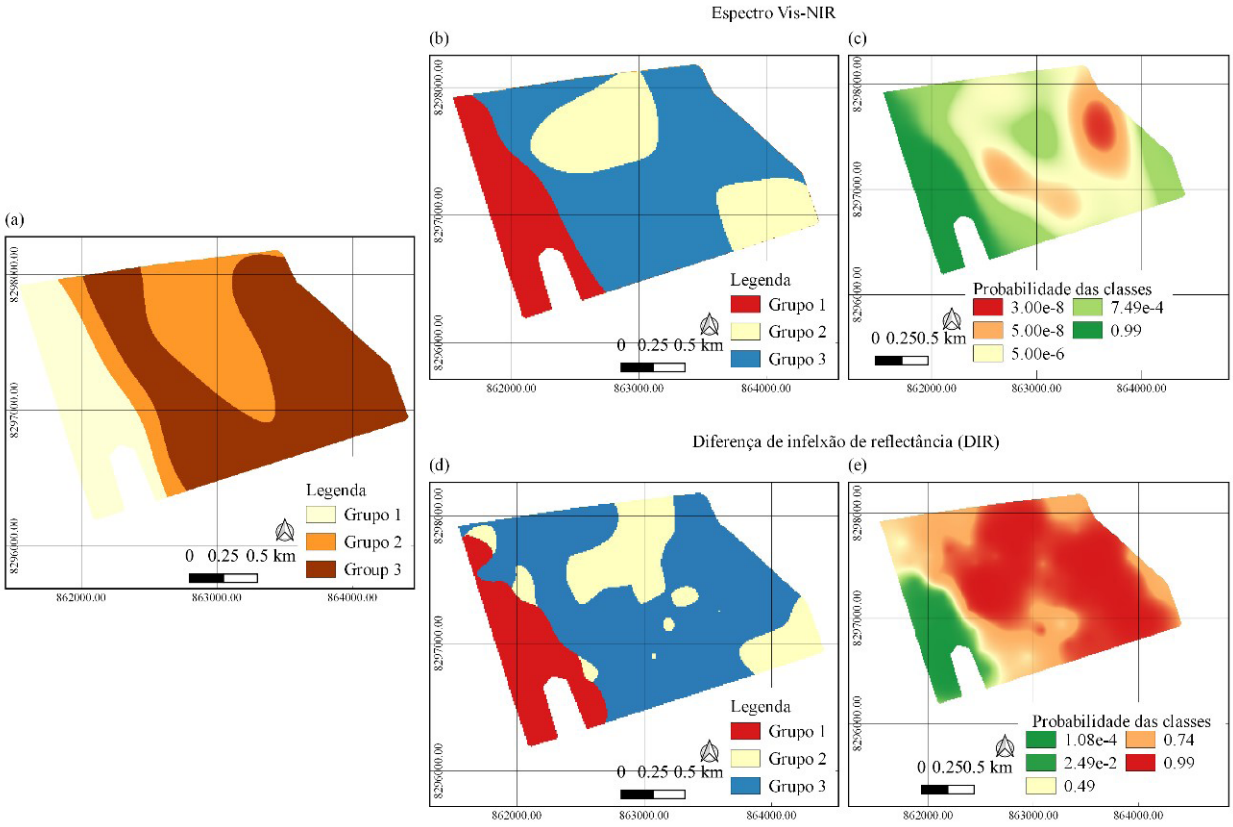


Figura 1. (a) mapa de variabilidade espacial dos grupos formados a partir da análise de agrupamento hierárquico ascendente (Ward) das variáveis discriminantes representativas das 22 propriedades dos Latossolos avaliados; **(b)** mapa temático do espectro completo Vis-NIR; **(d)** mapa da diferença de inflexão de refletância (DIR) das bandas espectrais entre 730-930, 1.800-1.950 e 2.218-2.290 nm, obtidas a partir dos espectros do horizonte Bw dos Latossolos que apresentaram correlação espacial com as variáveis discriminantes; **(c)** mapa de probabilidade espacial de classificação de grupos pelo espectro completo; **(e)** mapa de probabilidade espacial de classificação de grupos pela DIR.
Fonte: adaptado de Oliveira et al. (2022).

grupos de solos na área. A declividade dos três grupos foi semelhante, próxima a 3%. O grupo 1 está localizado no sopé da encosta, com 1.045 m de altitude, e os grupos 2 e 3, com 1.077 e 1.067 m de altitude, respectivamente.

Das 22 propriedades químicas, mineralógicas e físicas do solo que foram utilizadas como variáveis independentes na análise discriminante, os índices Ki e Kr e o teor de argila foram os que mais contribuíram para discriminar os três grupos de solos (Figura 1a). A partir dessas variáveis foi possível classificar 80% dos dados amostrais utilizando os espectros completos. O grupo 1 apresentou precisão de 100%, seguido dos grupos 3 e 2, com precisão de 86% e 58%, respectivamente. Portanto, os índices Ki e Kr e o teor de argila foram os melhores indicadores da variabilidade espacial dos solos presentes no campo estudado, particularmente do Latossolo Háplico. Embora os solos estudados tenham a mesma origem geológica (rochas metassedimentares compostas por argilitos), a variabilidade espacial do Latossolo Háplico foi observada em detalhes, conforme demonstrado pela associação entre o cluster e as análises discriminantes (resultado apresentado em Oliveira et al., 2022). O efeito da ação conjunta do regime hídrico e da variabilidade local da topografia do terreno sobre os índices Ki e Kr e teor de argila (Reatto et al., 2008; Camargo et al., 2008) explica as diferenças qualitativas e quantitativas encontradas para as propriedades geoquímicas e físicas dos três grupos de solos identificados em campo.

O grupo 1 está localizado no sopé da encosta e apresentava uma curvatura vertical convexa, com tendência de fluxo de água horizontal. Isso causou a menor proporção de hematita e goethita e também os teores de óxidos, especificamente de ferro e alumínio, na fração argila, em relação aos grupos 2 e 3. O grupo 2, localizado no centro do talhão, apresentou curvatura vertical do terreno côncava (Figura 1a). Esse grupo apresentou os menores índices de Ki e Kr e os maiores teores de gibbsita, óxidos de ferro e alumínio quando comparado ao grupo 3, apesar dos valores semelhantes para teor de argila. Esses resultados sugerem a predominância de infiltração de água e movimentação vertical. Essa condição edáfica também permite caracterizar a maior mobilidade dos óxidos de sílica, uma vez que os índices Ki e Kr são utilizados como indicadores do grau e do produto do intemperismo do solo, com base nas relações entre os teores de SiO_2, um óxido de alta mobilidade, e de Al_2O_3 e Fe_2O_3, óxidos de baixa mobilidade. Portanto, os grupos 2 e 3 diferiram quanto ao intemperismo, principalmente pelas diferenças nos tipos de declividade do terreno bem como pelo fato de que o grupo 2 apresentou maior dessilicação. Esses resultados confirmam o efeito do relevo e do fluxo hidrológico na variabilidade espacial da mineralogia e também que os grupos formados em campo apresentam características de drenagem e ambiente diferentes para a transformação de óxidos de sílica, ferro e alumínio.

Globalmente, o potencial dos espectros completos do Vis-NIR para a construção de mapas temáticos de propriedades do solo (Figura 1b) pode ser explicado pela correlação espacial entre a resposta espectral do solo e os índices geoquímicos (índices Ki e Kr e teor de argila) e morfológicos (microagregados). Essas propriedades foram condicionadas principalmente por fatores topográficos e hidrológicos em escala de campo e têm influência direta na intensidade e concavidade das bandas espectrais 400-510, 730-930, 1290-1450, 1800-1950, 2000-2218 e 2218-2290 nm (Oliveira et al., 2022). No entanto, quando os espectros foram reduzidos por meio da DIR, houve perda de informação importante dos espectros quando relacionados com a variabilidade espacial das propriedades do solo (Figura 1c). A perda de informação do espectro com o cálculo da DIR está especificamente relacionada à descaracterização da concavidade do espectro associada à intensidade de refletância, que é uma característica importante da resposta espectral para discretizar diferentes grupos de solos. No presente trabalho, o aumento do teor de argila promoveu um aumento da concavidade dos espectros e, quando a distribuição granulométrica foi homogênea, o aumento nos índices Ki e Kr diminuiu a concavidade da banda espectral. Com isso a redução do espectro por meio da DIR levou à perda da relação espacial do espectro com os índices geoquímicos, em solos com granulometria mais homogênea, e com o teor de argila, em solos com granulometrias distintas (Figura 1c). Um estudo anterior das respostas espectrais do solo desta área (Oliveira et al., 2016) mostrou que a concavidade da banda espectral e a intensidade de refletância nos comprimentos de onda de 436, 546 e 700 nm estão relacionadas com a proporção de microagregados ($\Phi_{250\text{-}1.000\ \mu m}$).

É importante salientar que, com a utilização dos espectros completos Vis-NIR (Figura 1b), foi possível discretizar, dentro de uma mesma classe (Latossolo) um grupo argiloso (grupo 1) e outros muito argilosos (grupos 2 e 3). Essa classificação foi possível levando em consideração os valores de índice de vermelho; teores de sílica, alumínio e ferro; densidade aparente; e proporção de microagregados. Esses resultados destacam a importância da variabilidade espacial do processo de dessilicificação e das estruturas micromorfológicas presentes no campo estudado, que ca-

racterizam os horizontes B e podem ser afetadas diferentemente pelo uso e manejo do solo, conforme observado por Oliveira et al. (2019). A determinação dos grupos 2 e 3 (áreas muito argilosas) é essencial para o manejo na agricultura de precisão, pois o manejo específico do local pode proporcionar melhorias substanciais no uso da água (Hedley e Yule, 2009), aumentando a produtividade e reduzindo o impacto de efeitos climáticos adversos. No entanto, esse nível de caracterização foi perdido quando o espectro foi reduzido pela caracterização da DIR. Assim, métodos como a DIR, a redução do número de comprimentos de onda e outros métodos de redução ou simplificação do espectro devem ser vistos com cautela quando utilizados para análise da variabilidade espacial de propriedades de solos e construção de mapas temáticos, sobretudo devido à possibilidade de perda de informação importante na relação entre os diferentes atributos do solo e os espectros.

4 CONCLUSÕES

A correlação entre os espectros completos Vis-NIR e as propriedades selecionadas a partir da análise discriminante permitiram relacionar a variabilidade espacial das características espectrais à das propriedades do solo sem o uso de modelos de calibração como etapa intermediária. Os espectros completos Vis-NIR demonstraram a precisão necessária para mapear os grupos de solos observados em campo, o que permitiu observar, em detalhes, a variabilidade espacial do solo do campo estudado. Métodos de redução ou simplificação das bandas espectrais, como a diferença de inflexão de refletância, devem ser vistos com cautela quando o objetivo é analisar a variabilidade espacial de propriedades de solos e a construção de mapas temáticos delas.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa (projeto 11140900101.06.04), ao programa Capes/Cofecub e ao CNPq pelo apoio financeiro e pela concessão de bolsas de estudo durante a realização do projeto.

REFERÊNCIAS

BAZAGLIA FILHO, O.; RIZZO, R.; LEPSCH, I. F.; PRADO, H.; GOMES, F. H.; MAZZA, J. A.; DEMATTÊ, J. A. M. Comparison between detailed digital and conventional soil maps of an area with complex geology. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. *37*, n. 5, p. 1136-1148, 2013. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-06832013000500003.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. I - Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. *32*, n. 6, p. 2269-2277, 2008. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600006.

COOK, S. E.; CORNER, R. J.; GREALISH, G.; GESSLER, P. E.; CHARTRES, C. J. A rule-based system to map soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. *60*, n. 6, p. 1893-1900, 1996. DOI: http://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000060039x.

HABERHAUER, G.; RAFFERTY, B.; STREBL, F.; GERZABEK, M. H. Comparison of the composition of forest soil litter derived from three different sites at various decompositional stages using FTIR spectroscopy. **Geoderma**, v. *83*, n. 3-4, p. 331-342, 1998. DOI: http://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00008-1.

HEDLEY, C. B.; YULE, I. J. Soil water status mapping and two variable-rate irrigation scenarios. **Precision Agriculture**, v. *10*, n. 4, p. 342-355, 2009. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-009-9119-z.

NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. *70*, n. 2, p. 393-407, 2006. DOI: http://doi.org/10.2136/sssaj2003.0285.

NANNI, M. R.; DEMATTE, J. A. M.; SILVA JUNIOR, C. A.; ROMAGNOLI, F.; SILVA, A. A.; CEZAR, E.; GASPAROTTO, A. C. Soil mapping by laboratory and orbital spectral sensing compared with a traditional method in a detailed level. **Journal of Agronomy**, v. *13*, n. 3, p. 100-109, 2014. DOI: http://doi.org/10.3923/ja.2014.100.109.

ODLARE, M.; SVENSSON, K.; PELL, M. Near infrared reflectance spectroscopy for assessment of spatial soil variation in an agricultural field. **Geoderma**, v. 126, n. 3-4, 193-202, 2005. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.09.013.

OLIVEIRA, J. F.; BROSSARD, M.; CORAZZA, E. J.; GUIMARÃES, M. F.; MARCHÃO, R. L. Field-scale spatial correlation between soil and Vis-NIR spectra in the Cerrado biome of Central Brazil. **Geoderma Regional**, v. *30*, p. e00532, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00532.

OLIVEIRA, J. F.; BROSSARD, M.; CORAZZA, E. J.; MARCHÃO, R. L.; GUIMARÃES, M. F. Visible and near infrared spectra of Ferralsols according to their structural features. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. *24*, n. 3, p. 243-254, 2016. DOI: http://doi.org/10.1255/jnirs.1202.

OLIVEIRA, J. F.; MAYI, S.; MARCHÃO, R. L.; CORAZZA, E. J.; HURTADO, S. C.; MALAQUIAS, J. V.; GUIMARÃES, M. F. Spatial variability of the physical quality of soil from management zones. **Precision Agriculture**, v. *20*, n. 6, p. 1251-1273, 2019. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-019-09639-9.

RAMIREZ-LOPEZ, L.; WADOUX, A. C.; FRANCESCHINI, M. H.; TERRA, F. S.; MARQUES, K. P. P.; SAYÃO, V. M.; DEMATTÊ, J. A. M. Robust soil mapping at the farm scale with vis-NIR spectroscopy. **European Journal of**

Soil Science, v. *70*, n. 2, p. 378-393, 2019. DOI: http://doi.org/10.1111/ejss.12752.

REATTO, A.; BRUAND, A.; MARTINS, E. S.; MULLER, F.; SILVA, E. M.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; BROSSARD, M. Variation of the kaolinite and gibbsite content at regional and local scale in Latosols of the Brazilian Central Plateau. **Comptes Rendus Geoscience**, v. *340*, n. 11, p. 741-748, 2008. DOI: http://doi.org/10.1016/j.crte.2008.07.006.

RIZZO, R.; DEMATTÊ, J. A.; LEPSCH, I. F.; GALLO, B. C.; FONGARO, C. T. Digital soil mapping at local scale using a multi-depth Vis–NIR spectral library and terrain attributes. **Geoderma**, v. *274*, p. 18-27, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.019.

VASQUES, G. M.; DEMATTÊ, J. A. M.; ROSSEL, R. A. V.; RAMÍREZ-LÓPEZ, L.; TERRA, F. S. Soil classification using visible/near-infrared diffuse reflectance spectra from multiple depths. **Geoderma**, v. *223-225*, p. 73-78, 2014. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.019.

WEBSTER, R.; BURROUGH, P. A. Multiple discriminant analysis in soil survey. **Journal of Soil Science**, v. *25*, n. 1, p. 120-134, 1974. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1974.tb01109.x.

15

Variáveis radiométricas de solos podem reduzir custos para a implementação da agricultura de precisão?

Can radiometric soil variables reduce costs for the implementation of precision agriculture?

Rogério Costa Campos[1], Gean Nascimento Rocha[2], José Alexandre Melo Demattê[3]

[1] *Professor, Departamento de Matemática e Estatística, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas (RS), Brasil, rogerio.c.campos@hotmail.com*

[2] *Pesquisador, Louis Dreyfus Company, São Paulo (SP), Brasil, gean.nascimento.rocha@gmail.com*

[3] *Professor, Departamento Ciência do Solo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), Piracicaba, SP, Brasil, jamdemat@usp.br*

RESUMO

O custo e a escalabilidade da obtenção de dados são críticos para a implementação da agricultura de precisão (AP). Nas recomendações de adubação em taxa variável, a redução dos custos com análises de solos permite ampliar a amostragem e consequentemente elevar a qualidade dos mapas para as recomendações de precisão. Uma simulação de Monte Carlo foi utilizada para simular o efeito do desenho experimental na avaliação da viabilidade de redução de custos com análises quando variáveis radiométricas de solos são empregadas na estimativa dos atributos argila, matéria orgânica (MO) e capacidade de troca catiônica (CTC). A assimilação de variáveis radiométricas acontece no processo *Regression Kriging* (RK), enquanto o processo *Ordinary Kriging* (OK), amplamente utilizado na geração de mapas digitais para AP, é tomado como *benchmark* de modelo incompleto, que não utiliza variáveis radiométricas de solo e emprega apenas autocorrelação espacial do atributo. A avaliação é feita por meio de simulações de desempenho na estimativa dos atributos do solo em níveis de substituição de análises físico-químicas por análises radiométricas de solo. Com a redução do investimento em análises de solo, o desempenho relativo do processo RK aumenta para permitir que o custo do mapeamento de solo seja reduzido. O desempenho relativo geral do processo RK que assimila variáveis radiométricas é 38%, 27% e 23% superior na estimativa dos atributos argila, MO e CTC, respectivamente. Nos níveis de maior redução de custos, o desempenho relativo do processo RK é ainda maior, significando uma real oportunidade para produção de mapas digitais de solos a custos que podem viabilizar implementação da AP.

Palavras-chave: bioeconomia; espectrorradiometria; pedologia; recursos naturais.

ABSTRACT

The cost and scalability of obtaining data are critical for implementing Precision Agriculture (PA). On variable-rate fertilizer application, costs reduction with soil analysis makes it possible to expand sampling designs and consequently increase the quality of maps for precision farming. A Monte Carlo simulation was proposed to account for the experimental design effect on assessing the feasibility of reducing costs with soil analysis when soil radiometric variables are employed to estimate clay, organic matter (OM) and cation exchange capacity (CEC). The assimilation of radiometric variables takes place in the Regression Kriging (RK) process, while the Ordinary Kriging (OK) process, widely employed to produce digital maps for PA, is taken as a benchmark process of an incomplete model that does not assimilate soil radiometric variables but relies only on the spatial autocorrelation of soil attributes. Its estimates are so based only on the own attribute spatial autocorrelation. The assessment is made through simulations of the performance of estimating the average of soil attributes at increasing rates of replacement of physical-chemical analyzes by soil radiometric analyses. With the reduction of investment in soil analysis, the relative performance of the RK process increases to allow the cost with soil analysis to be reduced. The overall relative performance of the RK process, that assimilates radiometric variables, is 38%, 27% and 23% higher on estimating the clay, OM and CEC attributes, respectively. At higher levels of soil analysis reduction, the relative performance of the RK process is even higher, it means an opportunity to produce affordable digital soil maps to PA implementation.

Keywords: bioeconomy; natural resources; pedology; spectrorradiometry.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000075

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

Gerenciar o custo de produção ganha mais importância com a escalada de preços e a escassez dos insumos. Aumentar a eficiência na produção de alimentos pela aplicação dos conceitos da agricultura de precisão (AP) tem sido um dos caminhos na busca da lucratividade e sustentabilidade. Exceção se faz aos casos em que o custo para implementação da AP coloca em dúvida o retorno frente ao investimento. Por conta da importância do custo de implantação, é esperada uma valorização dos serviços de levantamento da variabilidade do sistema de produção. Principalmente os que ofereçam estratégias para redução de custos sem comprometer a acurácia dos levantamentos. Serviços mais eficientes para o levantamento da variabilidade das áreas de produção devem se aprimorar na redução dos custos de implementação.

O planejamento do desenho experimental para a coleta de amostras é a primeira etapa realizada no processo de obtenção da variabilidade espacial dos atributos físico-químicos do solo. O sucesso na proposição do desenho experimental baseia-se na obtenção do nível de variância tolerado no mapa de variabilidade. Não existe interesse na tomada de decisão sobre mapas de variabilidade com incerteza que extrapola os limites de recomendação. No entanto, na prática, os custos na fase experimental são de fato limitados pelo recurso disponível. Para preservar a qualidade do levantamento da variabilidade, os recursos empregados na coleta e nas análises laboratoriais de amostras de solos precisam ser otimizados.

A amostragem em grid regular é a mais praticada na expectativa de se capturar informações da variabilidade que deve ser manejada com base nos conceitos de AP. As taxas economicamente viáveis costumam não ser adequadas para capturar transições graduais (Hbirkou et al., 2012) e tendências na variação espacial (Valeriano; Prado, 2001). Não é raro a distribuição espacial do atributo do solo não ser capturada pela proposição do grid regular com densidade limitada pelo recurso financeiro disponível. Estima-se que cerca de 85% dos erros na aplicação de insumos na AP ocorram por conta da inadequação do planejamento experimental (Siqueira et al., 2010).

Variáveis auxiliares correlacionadas espacialmente podem reduzir custos e elevar a precisão do mapeamento de atributos do solo. Entre elas, dados radiométricos nas faixas de comprimento de onda do visível e infravermelho têm sido uma alternativa para o estudo do solo (Demattê et al., 2004a e Nanni et al., 2004). Análises radiométricas preservam as amostras e não demandam a utilização de reagentes químicos (Araújo et al., 2015). São realizadas com baixo custo, alta precisão e rapidez (Cécillon et al., 2009; Gogé et al., 2014). Quase a totalidade do custo de obtenção dos dados diz respeito ao custo de aquisição do espectrorradiômetro.

Teor de argila, matéria orgânica (MO) e ferro, comprovadamente, guardam estreita relação com dados radiométricos de solo (Demattê et al., 2010; Stenberg et al., 2010). Obtidas por equipamentos calibrados, medidas radiométricas têm sido recomendadas para substituir determinações subjetivas empregadas na classificação de solos. Por exemplo, a cor do solo, convencionalmente obtida por intérprete pedólogo de forma subjetiva, pode ser obtida de forma precisa em laboratórios de radiometria (Campos; Demattê 2004). Porém, quando generalizações geográficas são requeridas para a modelagem, a associação do atributo com a radiometria do solo ainda é um desafio. Demattê et al. (2004b) constataram dificuldade em modelar a associação linear dos atributos silte e saturação por alumínio com dados radiométricos.

Os elevados investimentos para coleta e análise de amostras restringem a otimização dos desenhos experimentais. Como consequência, mapas de variabilidade se tornam menos úteis para as recomendações em AP. Variáveis auxiliares adquiridas com baixo investimento são uma alternativa para manter a variância dos mapas de recomendação em níveis toleráveis. Essa constatação motivou investigar se variáveis radiométricas de solo podem reduzir a perda de qualidade de mapas de recomendação em cenários de redução de custos com análises físico-químicas. A verificação foi conduzida com base na redução do erro de estimação entre dois processos; um que utiliza variáveis radiométricas de solos como auxiliares (processo RK) e outro que apenas minimiza a variância com base na estrutura de autocorrelação espacial do atributo (processo OK). Para simular a incerteza no posicionamento das amostras do grid a cada percentual de redução de análises de solo, uma simulação de Monte Carlo foi utilizada com mil reconfigurações aleatórias do desenho experimental para cada nível de redução. Em cada simulação, o processo realiza uma indicação aleatória das amostras que serão analisadas (ajuste do modelo) e das amostras que terão apenas as variáveis radiométricas (teste do modelo). Por fim, o EMA das simulações é empregado para uma análise de desempenho do processo RK na redução de custos na produção de mapas de solos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudos

A área de estudo foi selecionada por conta da sua alta variabilidade. A variação da paisagem e do material de origem resulta em alta variabilidade no processo de formação de solos na área. Dezoito classes de solos foram mapeadas nos 184 ha (Nanni et al., 2004). A área tem 184 ha cultivados com cana-de-açúcar e está localizada no município de Rafard/SP. O relevo é caracterizado como ondulado e suave ondulado, com altitude entre 475 e 565 m. Os materiais geológicos variam em arenitos, argilitos e folhelhos pertencentes à formação do Grupo Tubarão e basaltos da formação Serra Geral. A alta variabilidade na coloração dos solos é capturada pela variabilidade espectral dos solos na região visível. Transições abruptas nos atributos físico-químicos do solo ocorrem no sentido sudeste-noroeste e impõem limitações nas estimações realizadas por modelos contínuos de variação espacial gradual com hipótese de média espacial constante. A distribuição dos atributos físicos do solo é bimodal sugerindo a existência de mais de uma estrutura de variação espacial na área.

2.2 Coleta de dados e análises físico-químicas

Foram estabelecidos 184 pontos em grid regular de 100 x 100 m para a coleta de amostras de solo. Cada ponto do grid foi amostrado na camada de 0-20 cm, as amostras coletadas foram secas em estufa a 50 °C por 48 horas e depois peneiradas em peneira de 2 mm. A análise física dos teores argila (g/kg) foi realizada conforme o método do densímetro (Camargo et al., 1986). Os teores de matéria orgânica (g/Kg) e a capacidade de troca catiônica ($cmol_c/dm^3$) foram determinados de acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2011).

2.3 Dados espectrais

Medidas radiométricas das amostras foram obtidas com o sensor IRIS – *Infra-Red Intelligent Spectroradiometer* – no intervalo da faixa espectral de 400 a 2.500 nm. O sensor possui resolução espectral de 2 nm entre 400 e 1.000 nm e 4 nm para a faixa de 1.000 a 3.000 nm. O fator de reflectância bidirecional (FRB) (Nicodemus et al., 1977) foi determinado pela razão entre a radiância da amostra e a radiância de uma placa lambertiana de sulfato de bário.

2.4 Processos de estimação

Uma generalização do processo de interpolação espacial pelo método RK (Hengl et al., 2004) foi simulada com a assimilação de variáveis radiométricas. A análise de desempenho foi baseada no desempenho relativo em relação ao processo OK, tomado como *benchmark* por ser amplamente utilizado na produção de mapas para AP. Seu processo de interpolação emprega apenas a autocorrelação espacial nas estimativas do atributo do solo. Na simulação de Monte Carlo, pontos com a análise do atributo foram removidos e estimados pelos dois processos, RK e OK. No processo RK, a regressão linear foi empregada para modelar a tendência de cada atributo na área, a banda espectral com maior associação espacial com o atributo foi tomada como preditora na análise de regressão. A estrutura de covariação do resíduo da regressão foi modelada como modelos esféricos e exponenciais de variograma. Ao comparar o desempenho dos dois processos, foi possível mensurar a precisão nas estimativas nos diferentes níveis de redução de análises de solo conferida pela assimilação das variáveis espectrais como auxiliares.

2.5 Simulação de Monte Carlo

Os processos de estimação foram verificados em uma simulação computacional para inserir o efeito da aleatoriedade na seleção de pontos do grid onde as análises físico-químicas não seriam realizadas em função do nível de redução dos custos com análises. Os pares atributo e "variável espectral" do solo, definidos na seleção por força de associação, foram submetidos a uma simulação de Monte Carlo para verificar a precisão dos métodos de interpolação com (RK) e sem (OK) variáveis espectrais (Figura 1). Para cada nível de redução, mil simulações foram realizadas para verificar a precisão da estimativa da média global de forma independente. A cada interação, pontos do grid foram aleatoriamente removidos na proporção da redução e separados para predição independente, os pontos remanescentes foram utilizados para o ajuste do modelo utilizado para a predição independente nas posições aleatoriamente removidas a cada interação. Assim foram produzidos os conjuntos de ajuste e de predição a cada interação que produziu uma estimativa da média global quando estimados pelos dois processos a cada interação.

A qualidade da estimação foi avaliada com base na precisão conferida na estimação da média global do atributo na área. O procedimento assume que, para um desenho experimental possível com os recursos disponíveis, o desempenho do processo de estimação é avaliado com base na precisão da estimação da média do atributo na área. A média global "verdadeira" do atributo é obtida da melhor informação disponível, que considera o grid completo com a informação dos 184 pontos de coleta. A cada interação, uma estimativa da média é tomada com a inclusão dos pontos estimados de forma independente. O erro médio abso-

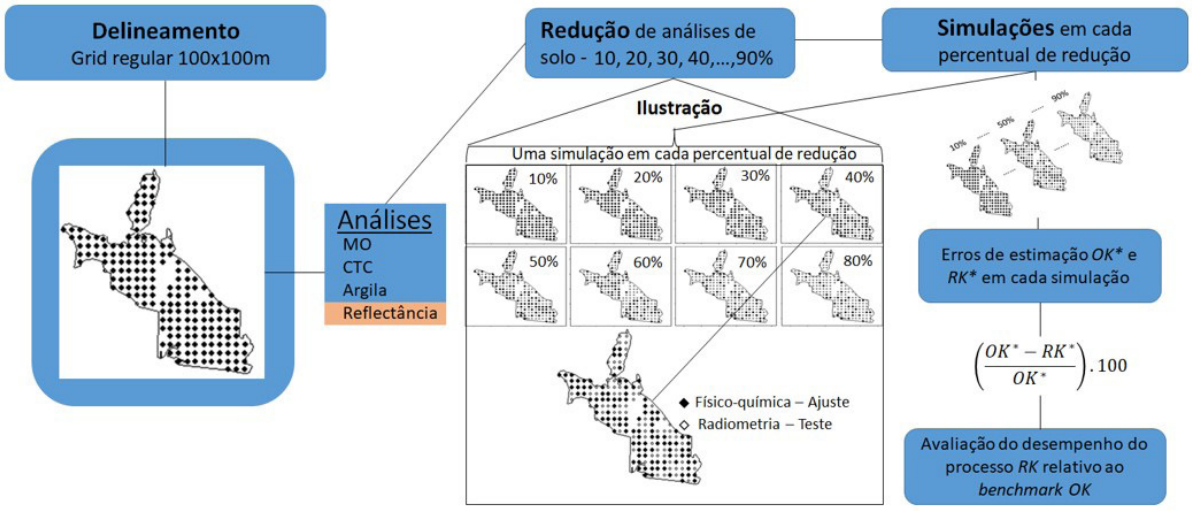


Figura 1. Ilustração da simulação de Monte Carlo para indicação aleatória dos pontos para as posições de ajuste (com análises físico-químicas + radiométricas) e de teste (apenas com análises radiométricas) em cada taxa de amostragem. O erro médio absoluto na estimação global dos atributos é obtido nos processos OK e RK em cada interação. Por fim, o desempenho relativo do processo RK sobre o *benchmark* OK é obtido em cada nível de redução de análises de solo.

luto (EMA) foi então obtido nas mil simulações para cada nível de remoção aleatória de pontos de análise.

3 RESULTADOS

A seleção dos modelos e das variáveis radiométricas auxiliares tem impacto na precisão obtida com a técnica RK e consequentemente no nível de redução de custos com análises avaliadas neste ensaio. Modelos e variáveis radiométricas geograficamente independentes motivaram estudos que evidenciaram o potencial da radiometria na quantificação dos atributos do solo, mas que também apontaram a complexidade para realizar a quantificação de forma independente da localização geográfica.

Nesse ensaio, o objetivo central foi verificar o ganho de precisão em uma área específica com alta variabilidade e complexa estruturação espacial. O procedimento para seleção da banda espectral foi baseado na determinação da força de associação global entre o atributo e a banda espectral (Tabela 1). A banda com maior associação com o atributo foi tomada como variável dependente no modelo linear simples de onde se obteve a tendência do atributo na área para as estimações com o processo RK.

As mil simulações em cada percentual de redução de análises produziram cenários de predição para estimação da média global com um investimento fixo para o número de análises de solo (Figura 1), mas com liberdade aleatória para reconfiguração espacial dos conjuntos de ajuste e teste no grid de coleta. Essa simulação permitiu avaliar o desempenho dos processos na designação aleatória dos pontos onde as análises não seriam realizadas. As realizações aleatórias das

Tabela 1. Correlação global entre bandas atributos do solo e bandas espectrais.

Atributo	Intervalo da banda (nm)	Correlação global
Argila	2389-2498	-0.87
Matéria orgânica	719-814	-0.73
CTC	2389-2498	-0.67

estimativas da média global permitiram dessa forma avaliar a performance dos métodos OK e RK em diferentes arranjos espaciais no mesmo percentual de redução de análises de solo. Consequentemente, a precisão dos métodos é avaliada com a incorporação do efeito aleatório associado às possibilidades de reconfiguração dos pontos em ajuste e teste.

De forma consistente, a métrica de precisão da estimativa indica que o processo RK apresenta desempenho superior ao OK na estimativa da média global dos atributos (Tabela 2). As estimativas realizadas para os pontos de teste são mais precisas com o método RK em consequência da associação espacial entre a banda espectral e o atributo do solo, mostrando que o modelo de tendência é de utilidade relevante na produção de mapas de solo com menor investimento em análises.

À medida que o investimento em análise de solo diminui, a precisão obtida com o processo RK se degrada menos que a precisão obtida com a técnica OK. A maior estabilidade da precisão na simulação de diminuição de investimento aponta para a viabilidade de se reduzir os custos com análises quando medidas radiométricas estão disponíveis. Para o caso da argila, entre 70% e 90% de utilização de análises físico-químicas, o nível

Tabela 2. Avaliação da precisão das técnicas OK e RK na estimativa da média global em níveis de redução do investimento em análises de solo.

		Argila			Matéria orgânica			CTC		
(%)	n	OK*	RK*	DR (%)	OK*	RK*	DR (%)	OK*	RK*	DR (%)
90	163	10.7	7.1	33.3	0.8	0.6	24.7	4.3	3.5	19.9
80	143	21.7	14.3	33.8	1.6	1.2	25.7	8.8	7.1	18.7
70	130	29.1	19.0	34.5	2.1	1.6	24.8	11.9	9.6	19.4
60	110	41.6	26.6	36.1	2.9	2.2	25.8	17.0	13.4	21.2
50	93	52.9	33.3	37.1	3.7	2.7	26.6	21.8	16.7	23.2
40	73	68.3	41.2	39.6	4.6	3.3	27.8	27.7	20.8	25.0
30	53	86.4	49.8	42.3	5.7	4.0	29.4	34.2	25.1	26.6
20	40	100.7	55.5	44.9	6.4	4.5	29.4	38.7	28.5	26.3

OK*: erro médio absoluto na estimativa da média global pelo processo OK, RK*: erro médio absoluto na estimativa da média global pelo processo RK e DR: desempenho relativo do processo RK sobre o processo OK obtido como $\left(\frac{OK^* - RK^*}{OK^*}\right).100$.

de precisão obtido com a técnica OK demandou 20% a mais de investimento (Tabela 2) para o mesmo nível de precisão obtido com a técnica RK. Entre 20% e 60% de utilização de análises, a vantagem da técnica RK é mais evidente, um EMA de 55.5 acontece com 20% de investimento, enquanto a técnica OK demandou 50% de investimento para um EMA similar de 52.9.

Para a matéria orgânica e a CTC, a superioridade do processo RK também é evidente, principalmente com o aumento da superioridade quando o investimento em análises se torna inferior a 50% (Figura 2). Na estimação da matéria orgânica, a precisão do processo RK (EMA = 3,3) obtida com 40% de análises é similar à precisão do processo OK (EMA = 2,9) obtida com 60% de análises. No caso da CTC, os resultados são semelhantes e sugerem a possibilidade de redução de investimento equivalente se o processo RK é utilizado.

Na estimação da argila, o processo RK apresentou o maior desempenho relativo em relação ao OK entre os atributos avaliados. Considerando todos os níveis de redução de análises de solo, RK foi em média 38% superior ao OK na estimação da argila. Nas maiores reduções de análises, entre 20% e 40%, a superioridade do processo RK sobe para 42%. Na estimação da argila, o aumento do desempenho relativo foi sempre crescente ao longo da simulação de redução do investimento em análises (Figura 2). Na impossibilidade de se realizar uma boa estimativa da estrutura espacial por conta da subamostragem, o processo OK perde precisão. Já o processo RK, com a informação da banda espectral espacialmente associada à argila, consegue mitigar a limitação do desenho experimental em capturar a estrutura espacial da argila.

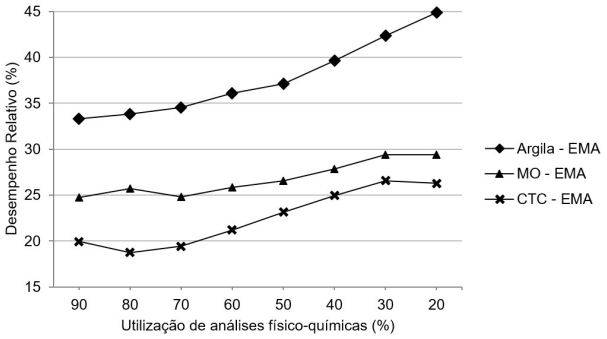


Figura 2. Desempenho relativo do processo RK em relação ao processo OK obtido como $\left(\frac{OK^* - RK^*}{OK^*}\right)100$ em cada nível de utilização de análises físico-químicas.

No caso da matéria orgânica e da CTC, o desempenho relativo médio foi menor, 27% e 23% respectivamente (Figura 2). Nas faixas de maior degradação de análise de posições do grid, entre 20% e 40% de amostras analisadas, a superioridade do RK sobe para 29% e 26% respectivamente. Entre 70% e 40% de análises, o desempenho relativo é crescente. Nessa faixa, à medida que os pontos de amostragem ficam mais distantes, a associação espacial entre a banda espectral e o atributo compensam a problemas de ajuste do semivariograma na aplicação do processo RK. Diferente da estimação da argila, o desempenho relativo do processo RK sobre o OK se estabiliza e deixa de ser crescente nas menores taxas (30% a 20%) de análise.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados produzidos neste ensaio foram obtidos de uma simulação exaustiva para comprovar o potencial de variáveis radiométricas de solo na redução de custos na produção de mapas digitais de solo para AP. A estratégia de simulação permitiu inserir no processo a componente aleatória na designação de posições de coleta onde acontece redução de investimentos em análises físico-químicas de solo. O processo *Regression Kriging* (RK) promoveu aumento de precisão de forma independente da reconfiguração do delineamento para uma porcentagem de redução de investimento em análises de solo. O processo de seleção das posições ainda pode ser otimizado e consequentemente tornar o processo ainda mais vantajoso. Ficou demonstrado que nos levantamentos de precisão em áreas com alta variabilidade espacial, o custo com análise de solos pode ser reduzido com o emprego do processo de estimação que assimila dados radiométricos de solo. A assimilação dos dados radiométricos por meio da técnica RK pode ser reconfigurada, outras abordagens na fase de seleção de variáveis e ajuste de modelo ainda podem elevar substancialmente os níveis de precisão das estimativas. Por exemplo, métodos de aprendizagem computacional para direcionar os processos de reamostragem e interpolação podem ser empregados para tornar as interpolações menos dependentes do modelo de predição. A assimilação de dados radiométricos de solo permite reduzir o custo para produção de mapas digitais de solos e tornar a AP mais rentável e sustentável.

REFERÊNCIAS

Araújo, S. R.; Söderström, M.; Eriksson, J.; Isendahl, C.; Stenborg, P.;Demattê, J. A. M.. Determining soil properties in Amazonian Dark Earths by reflectance spectroscopy. **Geoderma**, v. *237-238*, p. 308-317, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.014.

Camargo, O. A.; Moniz, A. C.; Jorge, J. A.; Valadares, J. M. A. S. **Métodos de análise química e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico (IAC), 1986. 94 p. (Boletim técnico, 106)

Campos, R. C.; Demattê, J. A. M. Cor do solo: uma abordagem da forma convencional de obtenção em oposição à automatização do método para fins de classificação de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. *28*, n. 5, p. 853-863, 2004. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-06832004000500008.

Cécillon, L.; Barthès, B. G.; Gomez, C.; Ertlen, D.; Genot, V.; Hedde, M.; Stevens, A.; Brun, J. J.. Assessment and monitoring of soil quality using near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS). **European Journal of Soil Science**, v. *60*, n. 5, p. 770-784, 2009. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01178.x.

Demattê, J. A. M.; Campos, R. C.; Alves, M. C.; Fiorio, P. R.; Nanni, M. R. Visible–NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. **Geoderma**, v. *121*, n. 1-2, p. 95-112, 2004a. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.012.

Demattê, J. A. M.; Genú, A. M.; Fiorio, P. R.; Ortiz, J. L.; Mazza, J. A.; Leonardo, H. C. L. Comparação entre mapas de solos obtidos por sensoriamento remoto espectral e pelo método convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. *39*, n. 12, p. 1219-1229, 2004b. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2004001200009.

Demattê, J. A. M.; Nanni, M. R.; Silva, A. P.; Melo Filho, J. F.; Santos, W. C.; Campos, R. C. Soil density evaluated by spectral reflectance as an evidence of compaction effects. **International Journal of Remote Sensing**, v. *31*, n. 2, p. 403-422, 2010. DOI: http://doi.org/10.1080/01431160902893469.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. *2.* ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

Gogé, F.; Gomez, C.; Jolivet, C.; Joffre, R. Which strategy is best to predict soil properties of a local site from a national Vis–NIR database? **Geoderma**, v. *213*, p. 1-9, 2014. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.016.

Hbirkou, C.; Pätzold, S.; Mahlein, A. K.; Welp, G. Airborne hyperspectral imaging of spatial soil organic carbon heterogeneity at the field-scale. **Geoderma**, v. *175-176*, p. 21-28, 2012. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.017.

Hengl, T.; Heuvelink, G. B. M.; Stein, A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. **Geoderma**, v.*120*, n. 1-2, p. 75-93, 2004. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.08.018.

Nanni, M. R.; Demattê, J. A. M.; Fiorio, P. R. Análise discriminante dos solos por meio da resposta espectral no nível terrestre. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.*39*, n. 10, p. 995-1006, 2004. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2004001000007.

Nicodemus, F. , Richmond, J. , Hsia, J. , Ginsberg, I. and Limperis, T. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. **National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1977**, [online], https://doi.org/10.6028/NBS.MONO.160 (Accessed October 22, 2024)

Siqueira, D. S.; Marques Junior, J.; Pereira, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, v.*155*, n. 1-2, p. 55-66, 2010. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.024.

Stenberg, B.; Rossel, R. A. V.; Mouazen, A. M.; Wetterlind, J. Visible and near infrared spectroscopy in soil science. **Advances in Agronomy**, v. *107*, p. 163-215, 2010. DOI: http://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7.

Valeriano, M. M.; Prado, H. Técnicas de geoprocessamento e de amostragem para o mapeamento de atributos anisotrópicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. *25*, n. 4, p. 997-1005, 2001. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-06832001000400022.

16

Técnicas de agricultura de precisão na obtenção de dados altimétricos para planejamento do solo e da água

Precision agriculture techniques for obtaining altimetric data for conservation planning soil and water

Antônio Luis Santi[1], Ropson Delavi Jendrzikowski[2] , Filipe Belchor Barcelos[3], Luiz Fernando Pezzini Ribas[3], Ezequiel Zibetti Fornari[4], Caroline Montanari Giraldi[5], Luís Felipe Rossetto Gerlach[6]

[1] *Professor Doutor, Departamento de Ciências Agronômicas e Ambientais, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Campus Frederico Westphalen, Frederico Westphalen (RS), Brasil, santi_pratica@yahoo.com.br*

[2] *Acadêmico, Pós-Graduação em Agronomia - Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Campus Frederico Westphalen, Frederico Westphalen (RS), Brasil, ropsondelavi@hotmail.com*

[3] *Acadêmico, Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Campus Frederico Westphalen, Frederico Westphalen (RS), Brasil, filipe.belchor@acad.ufsm.br*

[4] *Acadêmico, Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Campus Frederico Westphalen, Frederico Westphalen (RS), Brasil, luiz.ribas@acad.ufsm.br*

[5] *Acadêmico, Pós-Graduação em Agronomia - Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Campus Frederico Westphalen, Frederico Westphalen (RS), carolinegiraldi@hotmail.com*

[6] *Acadêmico, Pós-Graduação em Agronomia - Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Campus Frederico Westphalen, Frederico Westphalen (RS), lfelipeross@hotmail.com*

RESUMO

A agricultura de precisão vem ganhando cada vez mais espaço no decorrer dos anos pelos vários benefícios que tem proporcionado aos seus usuários. O objetivo deste estudo foi realizar a manipulação dos dados altimétricos com a finalidade de facilitar as práticas conservacionistas do solo e da água em sistema de plantio direto. Para isso, realizou-se a coleta de pontos de altimetria em uma área com 46 hectares, cultivada em sistema de plantio direto, localizada no município de São Miguel das Missões-RS. Foram coletados pontos de altimetria a partir de três métodos. O primeiro método consistiu da coleta dos pontos a partir de mapa de execução da aplicação em três operações agrícolas diferentes. O segundo método foi a partir de um aplicativo específico para a coleta de dados altimétricos, que faz parte de um conjunto de tecnologia embarcada, em três operações agrícolas, e o terceiro método de coleta de dados altimétricos foi a partir de imagem de satélite georreferenciada, com resolução espacial de 30 metros. Posteriormente, os dados foram submetidos a análises geoestatísticas, em que foi utilizado o semivariograma pelo método da verossimilhança. Os pontos coletados em todos os métodos e práticas agrícolas apresentaram melhor ajuste para o modelo Gaussiano. No entanto, os dados coletados a partir de imagens de satélite para criação de linhas de direcionamento para piloto automático podem comprometer a eficiência deste serviço, uma vez que as coletas são realizadas com uma resolução muito baixa e uma elevada distância entre o paralelismo, fazendo com que haja distorções e não identificação de microrrelevos dentro da área de coleta, podendo mascará-los. Pelo ajuste semivariográfico, todos os métodos são passíveis de serem utilizados para o planejamento estratégico da automatização de algumas práticas, como: projeto de linhas de direcionamento automático para máquinas agrícolas próximo do nível criado em SIGs para semeadura, colheita, pulverização, escarificação e subsolagem, e tráfego controlado de máquinas agrícolas dentre outras, que não exigem alta precisão e acurácia dos dados altimétricos. Já para a criação de mapas de declividade e de acúmulo de água, vai depender de com qual finalidade o método será utilizado, como, por exemplo, para a identificação do acúmulo de água e posteriormente geração de drenos, são exigidas alta acurácia e precisão da altimetria. Dessa forma, sugere-se a coleta com o método do aplicativo específico durante a execução da semeadura. As tecnologias são uma alternativa eficiente para utilização em operações agrícolas que visam à conservação do solo e da água, além de serem economicamente viáveis para este fim, por estarem disponíveis em quase todas as máquinas agrícolas modernas.

Palavras-chave: geoestatística; conservação do solo e da água; mecanização agrícola.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000083

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

ABSTRACT

Precision farming has been gaining more and more space over the years for the many benefits it has provided to its users. The objective of this study was to perform the manipulation of the altimetric data with the purpose of facilitating the conservation practices of soil and water in no tillage system. For this, altimetry points were collected in an area of 46 hectares, cultivated under no-tillage system, located in the municipality of São Miguel das Missões, RS. Altimetry points were collected from three methods. The first method consisted of collecting the points from the implementation map of the application in three different agricultural operations. The second method was based on a specific application for altimetric data collection, which is part of a set of embedded technology, in three agricultural operations; and the third method of altimetric data collection was from georeferenced satellite image, with spatial resolution of 30 meters. Subsequently, the data were submitted to geostatistical analysis, where the semivariogram was used by the likelihood method. The points collected in all agricultural methods and practices presented better fit for the Gaussian model. However, data collected from satellite imagery to create routing lines for autopilot can compromise the efficiency of this service, since the collections are performed with a very low resolution, and a high distance between the parallelism, making with which there are distortions and no identification of micro reliefs within the collection area, being able to mask them. For the semivariographic adjustment, all methods can be used to strategically plan the automation of some practices such as: design of automatic routing lines for agricultural machinery close to the level created in SIGs for sowing, harvesting, spraying, scarification and subsoiling, traffic controlled agricultural machinery among others, which do not require high accuracy and accuracy of altimetric data. In order to create slope and water accumulation maps, it will depend on the purpose to be used, such as for the identification of water accumulation and subsequent generation of drains, high accuracy and accuracy of altimetry are required. Thus, it is suggested to collect with the specific application method during the execution of the sowing. Technologies are an efficient alternative for use in agricultural operations that aim at soil and water conservation and are economically viable for this purpose because they are available on almost all modern agricultural machinery.

Keywords: geostatistics; soil conservation; agricultural mechanization.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão (AP) desde o seu surgimento teve como princípio a adoção de técnicas que permitissem o conhecimento detalhado de atributos, tanto do solo, quanto das plantas, e que, por fim, associados às intervenções localizadas, resultam em aumento da produtividade e em redução dos custos de produção, principalmente aqueles relacionados ao uso de fertilizantes.

O tráfego de máquinas e implementos agrícolas durante a realização das atividades agrícolas está interferindo diretamente no grau e na estrutura do solo, causando sérias alterações dos atributos físicos e hídricos (Unger; Cassel, 1991). Estes fatores afetam o movimento e a capacidade de infiltração de água, e interferem nas propriedades físicas do solo, influenciando nas condições naturais, que incluem precipitação, umidade e temperatura do solo (Cecilio, 2002). A modificação provocada na estrutura do solo devido à falta da conservação ocasiona graves interferências nas camadas superficiais e subsuperficiais, reduzindo a capacidade de infiltração e provocando fluxos superficiais, que destroem essas estruturas, as quais geralmente demoram anos para serem compostas (Llanillo et al., 2013).

O escoamento superficial da água no solo ocorre onde as estruturas do solo estão sem conservação adequada e, desta forma, ficam sujeitos ao escorrimento das partículas do solo, transportando nutrientes e defensivos agrícolas até os rios (Merten; Minella, 2013). O deflúvio superficial responsável pela erosão hídrica é o processo conhecido pela relação das características do solo, que são de extrema importância para um manejo eficaz de solo e água, com os cultivos agrícolas (Reichardt, 1996). Para as áreas com práticas de plantio direto, as taxas de infiltração de água no solo são maiores que nas áreas do sistema convencional (Gomez et al., 2009).

Para coletar dados de altimetria do terreno, a tecnologia embarcada em máquinas agrícolas e as imagens de satélites georreferenciadas, com o auxílio de *softwares* de Sistemas de Informação Geográficos (SIG), para manipulação dos dados altimétricos, podem ser interessantes, levando em consideração a finalidade da automatização de práticas e operações agrícolas, com foco em conservação do solo e da água em sistemas de plantio direto.

O objetivo deste estudo foi avaliar dados altimétricos obtidos durante operações agrícolas e imagens via satélite para o planejamento conservacionista do solo e da água em sistema de plantio direto.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A coleta dos dados foi realizada em uma área agrícola comercial com 46 hectares, cultivada em sistema de plantio direto, localizada no interior de São Miguel da Missões-RS, Brasil, entre as coordenadas geográfi-

cas 28°41'28.23"S e 54°22'32.72"O com 262,8 m acima do nível do mar. Caracterizado como Latossolo Vermelho distroférrico típico, são solos profundos, bem drenados, de coloração vermelha escura, argilosos com mais de 60% de argila.

O primeiro método para coleta de dados altimétricos consiste em extrair pontos a partir do mapa de execução da aplicação em três operações agrícolas diferentes: semeadura, pulverização e colheita.

O segundo método foi a partir de um aplicativo específico para a coleta de dados altimétricos, também em três operações agrícolas, o mesmo que faz parte de um conjunto de tecnologia embarcada, que é composto por um receptor de sinal GNSS equipado com sistema de correção de sinal RTK, um monitor no qual são inseridas e salvas as configurações para o aplicativo e para a realização das operações. Os dois métodos de coleta acontecem ao mesmo tempo da execução de cada operação agrícola.

Em todas as operações em que foram coletados os dados altimétricos, as máquinas agrícolas estavam equipadas com: piloto automático para direcionamento assistido; um monitor John Deere GS3, responsável pela geração e gravação dos dados coletados, e um receptor de posicionamento global, equipado com o sistema RTK, com correção em tempo real do seu posicionamento. As configurações de cada conjunto agrícola mecanizado foram aplicadas conforme recomendações do próprio fabricante. Os dados foram exportados do monitor para um pen drive, importados em um *software* SIG (SMS Advanced), e exportados para uma planilha de Excel (formato csv).

O terceiro método de coleta de dados altimétricos foi a partir de imagens de satélite georreferenciadas, os quais, oriundos da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de 30 m, foram adquiridos em formato geotiff com unidade de altitude em metros em sistema de coordenadas geográficas, Datum horizontal GSW 84 (*World Geodetic system 1984*) e Datum vertical EGM96 (*Earth Gravitational Model 1996*). A seguir, foram gerados os mosaicos correspondentes aos MDEs, SRTM-4 (Reuter et al., 2007) e TOPODATA (INPE, 2010), considerando as imagens adjacentes de cada modelo correspondentes à área de estudo. Para que pudesse haver comparação quantitativa dos MDEs, as imagens de cada modelo foram redimensionadas para uma resolução espacial comum. Os MDEs do SRTM-4 e TOPODATA foram reamostrados artificialmente para a resolução espacial 30 m por interpolação (método do vizinho mais próximo).

Posteriormente, os dados foram submetidos a análises geoestatísticas, nas quais foi utilizado o semivariograma pelo método da verossimilhança, empregando o programa R (R Core Team, 2017). O semivariograma permite o cálculo dos parâmetros envolvidos no modelo: a distância da dependência espacial (A), que é o alcance máximo da dependência espacial, indicando que, a partir dessa distância, termina a dependência entre os casos estudados; o efeito pepita (C0), que é o valor da semivariância da distância zero, que representa a variabilidade para escalas menores que a distância de amostragem, e a altura (C), que é a distância entre o efeito pepita e o patamar, intervalo esse no qual o semivariograma cresce, havendo dependência espacial. O patamar representa a altura na qual o semivariograma se estabiliza, aproximando-se da variabilidade total dos valores amostrados (Grego; Oliveira, 2015).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Coleta da altimetria e análises geoestatísticas

Cada operação agrícola realizada gerou um grande número de pontos, o que proporciona maior precisão aos resultados. Nas coletas realizadas a partir dos mapas de execução de cada operação agrícola, o número de pontos foi 30.858 para a operação de colheita, 12.187 para a operação de pulverização e 21.316 para a operação de semeadura. Para os dados coletados a partir do aplicativo específico embarcado para a operação de colheita, foram 41.917 pontos; para a operação de pulverização, 4.391 pontos, e para a operação de semeadura, 35.431 pontos. Para a coleta a partir da imagem georreferenciada dos dados de satélite SRTM e Topodata, foram 547 e 549 pontos, respectivamente.

O semivariograma é a principal ferramenta para estudar dependência espacial em geoestatística (Seidel; Oliveira, 2013). Dentre os modelos de semivariogramas mais utilizados para estes fins, destacam-se os modelos Esférico, Exponencial e Gaussiano, os quais possuem quatro parâmetros: o alcance, o patamar, o efeito pepita e a contribuição (Seidel; Oliveira, 2013). No presente trabalho, os modelos Exponencial e Esférico apresentaram efeito pepita puro e, dessa forma, o modelo que mais representa o comportamento dos dados, em todas as formas de coleta, foi o modelo Gaussiano.

A interpretação dos semivariogramas foi realizada pelos parâmetros do modelo, em que: o alcance (A) é a distância na qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente; Lag (h) refere-se a uma distância pré-definida, a qual é utilizada no cálculo do semivariograma; a semivariância [y(h)] indica o valor da dependência espacial entre amostras de uma determinada variável em função da distân-

cia entre elas; o efeito pepita (C0) representa a descontinuidade do semivariograma, no sentido de que, à medida que h tende a zero, γ (h) tende a um valor positivo C0; a contribuição C1 é a diferença entre o patamar e o efeito pepita, e caracteriza a dependência espacial de processos estocásticos contínuos; a contribuição é a variância estruturada, que é devida à estrutura espacial do fenômeno em estudo; o patamar (C = C0 + C1) seria a variância total do dados (Abreu et al., 2003; Seidel; Oliveira, 2013). Os modelos ajustados para as coletas de dados altimétricos apresentaram valores semelhantes dos parâmetros; no entanto, o modelo Gaussiano apresentou o valor de efeito pepita maior comparado aos demais modelos em todas as formas de coleta de dados e, da mesma forma, os valores de dependência espacial foram maiores no modelo Gaussiano (Tabela 1).

Abreu et al. (2003) estudaram a dependência espacial de diferentes tipos de solo em profundidade e observaram maior variabilidade com o aumento na profundidade no perfil do solo. Os modelos exponencial e esférico apresentaram valores de dependência espacial de zero, ou seja, não apresentam dependência espacial, e apresentam efeito pepita puro, totalmente

Tabela 1. Análise geoestatística dos dados de altimetria coletados nas diferentes operações agrícolas: (A) Coleta dos dados a partir de mapas obtidos durante a execução da semeadura, pulverização e colheita, (B) pontos coletados com o uso de aplicativo específico embarcado em máquinas agrícolas durante execução da semeadura, pulverização e colheita, e (C) pontos coletados através de imagens de satélite STRM 30 m e Topodata.

Coleta	Modelo*	C0	C	C1	DE	A	QME	RQME	R^2
Mapa de Elevação[A]									
Semeadura	Exp	0	240,37	240,37	0	1.200,49	0,12	0,35	0,97
	Sph	0	79,41	79,41	0	615,02	0,12	0,35	0,96
	Gau	2,04	62,19	60,15	3,17	213,8	0,14	0,38	0,98
Pulverização	Exp	0	185,54	185,54	0	828,13	0,02	0,15	0,96
	Sph	0	73,53	73,53	0	515,6	0,02	0,15	0,97
	Gau	2,45	63,37	60,91	3,73	214,1	0,31	0,56	0,98
Colheita	Exp	0	261,51	261,51	0	1.396,78	0	0,02	0,97
	Sph	0	77,48	77,48	0	634,68	0	0,02	0,96
	Gau	1,11	60,32	59,21	1,8	214,5	0,01	0,09	0,98
Aplicativo específico embarcado[B]									
Semeadura	Exp	0	420,21	420,21	0	2.404,64	0	0,01	0,97
	Sph	0	90,33	90,33	0	781,3	0	0,01	0,96
	Gau	1,66	59,66	58	2,71	223,19	0,01	0,09	0,98
Pulverização	Exp	0	114,81	114,81	0	688,36	0	0,02	0,96
	Sph	0	52,31	52,31	0	507,94	0	0,02	0,97
	Gau	1,23	45,22	43,99	2,65	195,6	0,02	0,15	0,98
Colheita	Exp	0	171,25	171,25	0	919,6	0	0,02	0,96
	Sph	0	65,33	65,33	0	551,46	0	0,02	0,97
	Gau	0,99	55,27	54,28	1,77	204,91	0,01	0,08	0,98
Imagem via satélite[C]									
SRTM 30m	Exp	1,24	91,48	90,24	0,01	1.455,77	0,04	0,21	0,96
	Sph	0,07	126,90	126,83	0,00	1.957,38	0,03	0,16	0,97
	Gau	0,52	58,04	57,52	0,01	223,28	0,02	0,15	0,98
Topodata	Exp	0,75	88,44	87,69	0,01	1.546,10	0,36	0,60	0,97
	Sph	0,00	173,89	0,00	0,00	1.972,47	0,28	0,53	0,96
	Gau	0,06	49,75	49,69	0,00	214,20	0,38	0,62	0,98

C0= Efeito Pepita; C= Patamar (C0 + C1); C1= Contribuição; DE= Dependência Espacial; A= Alcance; QME= Quadrado médio do erro; RQME= raiz quadrada do erro médio; R^2= coeficiente de determinação.

aleatório (Camargo, 1998). Nos casos com efeito pepita puro, em que a dependência espacial não pode ser quantificada, a informação que melhor representa esses dados é a média (Souza et al., 2014). Quando os parâmetros do modelo apresentaram similaridades entre eles, o maior grau de dependência espacial serviu para definir qual modelo apresentou o melhor ajuste (Dallacort et al., 2012).

O maior alcance foi observado para o modelo exponencial em todas as formas de coleta e este parâmetro representa a distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente (Tabela 1). A estatística clássica assume que a variação das características do solo dentro das unidades amostrais não são correlacionadas, ou seja, os pontos localizados em uma área cujo raio seja o alcance são mais semelhantes entre si do que os pontos separados por distâncias maiores (Carvalho et al., 2002). Menores valores de alcance foram estimados para o modelo Gaussiano. Pode-se observar, na Tabela 1, que os semivariogramas dos dados das operações agrícolas de coleta que apresentaram alcance superior e não foram ajustados como o modelo gaussiano.

Os valores do parâmetro patamar foram menores para o modelo Gaussiano em todas as formas de coleta de dados; este parâmetro seria a variância total dos dados, inferindo menor variância para o modelo Gaussiano. Da mesma forma, analisando o modelo Gaussiano isoladamente, podem-se observar menores valores de patamar para as coletas realizadas com o auxílio do aplicativo específico embarcado nas máquinas agrícolas e pelas imagens de satélite (Tabela 1).

3.2 Análise descritiva dos dados

Na Tabela 2, estão os valores da estatística descritiva dos dados obtidos após a Krigagen do mapa interpolado pelo modelo Gaussiano, ou seja, a análise após o processamento dos dados. Pela análise descritiva dos dados, é possível observar que não há maiores diferenças entre os métodos de coletas utilizados, sendo possível sua utilização para projetos e planejamentos de práticas conservacionistas de solo e água. No entanto, deve-se atentar para a verdadeira realidade das referidas operações com ênfase no tipo de sinal que está sendo utilizado para a coleta dos pontos. Bruti (2014) analisou métodos de coleta para geração de linhas de direcionamento para piloto automático, automatizando as taipas para irrigação de inundação em lavoura de arroz. Ao sobrepor os mapas confeccionados a partir dos pontos coletados nos métodos de operação de colheita e semeadura, observou-se que o método de coleta durante a semeadura apresentou melhor resultado.

3.3 Utilização da tecnologia embarcada e imagens de satélites para práticas conservacionistas

Após a realização da coleta dos dados altimétricos, a elaboração de mapas de curvas de nível pode ser realizada com base no histórico da área. A definição de qual será o manejo adotado na área deve

Tabela 2. Estatística descritiva dos dados de altimetria coletados nas diferentes operações agrícolas: (A) Coleta dos dados a partir de mapas obtidos durante a execução da semeadura, pulverização e colheita, (B) pontos coletados com o uso de aplicativo específico embarcado em máquinas agrícolas durante execução da semeadura, pulverização e colheita, e (C) pontos coletados através de imagens de satélite STRM 30 m e TOPODATA.

Coleta*	Mín	Máx	μ	EPA	σ^2	σ	Med	As	Curtose	CV
Mapa de elevação (A)										
Colheita	242,52	278,68	262,24	0,06	60,36	7,76	252,60	-0,07	-8.047,1	2,96
Pulverização	243,96	278,83	262,55	0,06	64,10	8,00	263,00	-0,06	-7.786,0	3,04
Semeadura	242,09	279,41	262,81	0,06	62,04	7,87	263,17	-0,09	-8.065,3	3,00
Aplicativo específico embarcado (B)										
Colheita	242,85	278,68	262,30	0,06	59,02	7,68	262,60	-0,03	-7.895,9	2,92
Pulverização	242,27	278,23	262,92	0,05	54,98	7,41	263,16	-0,04	-7.849,0	2,82
Semeadura	247,80	279,34	262,89	0,06	60,49	7,77	263,26	-0,08	-8.048,7	2,95
Imagem georreferenciada via satélite										
SRTM30m	245,02	278,85	262,31	0,06	58,15	7,62	262,60	-0,05	-7.858,4	2,95
Topodata	246,87	279,77	263,48	0,06	56,62	7,52	263,80	-0,03	-7.832,9	2,85

n= número de pontos coletados, μ= média; EPA= erro padrão; σ^2= variância; σ= desvio padrão; Med= Mediana; As= Assimetria; CV= coeficiente de variação; *n= 18.428.

ser planejado anteriormente juntamente com o produtor e com auxílio de uma equipe técnica qualificada. Todo o planejamento deve ser realizado baseando-se no histórico da área. É importante que o manejo seja realizado de forma que ocorra maior infiltração de água no solo e, para isso, um mapa de direcionamento da água é importante, pois desta forma pode-se definir o manejo que será adotado com a finalidade de otimizar o uso da água disponível na lavoura.

Os métodos de coleta de dados de elevação aplicados na área agrícola do experimento, aliados à geoestatística, mostram-se eficientes para a geração de projetos de linhas de direcionamento automático para máquinas agrícolas, possibilitando maior eficiência das operações agrícolas. Pelo ajuste semivariográfico, todos os métodos são possíveis de serem utilizados para o planejamento estratégico da automatização de algumas práticas, como: projeto de linhas de direcionamento automático para máquinas agrícolas próximo do nível criadas em SIGs para semeadura, colheita, pulverização, escarificação, descompactação, tráfego controlado de máquinas, entre outras práticas, que não exigem alta precisão e acurácia dos dados altimétricos.

Na medida em que, para a criação de mapas de declividade e de acúmulo de água, e geração de drenos, são exigidas alta acurácia e precisão da altimetria, seria indicada a coleta com o método do aplicativo específico durante a execução da semeadura, por demanda de maior precisão.

3 CONCLUSÃO

O método de coleta com uso do aplicativo específico na operação de semeadura é mais eficaz e recomendado para projetos que requerem maior precisão.

Os demais métodos de coleta de dados podem oferecer riscos de erros por apresentarem muitas interferências externas, como espaçamento entre passadas, paralelismo, oscilação de altitude por causa da massa da máquina, flutuação da suspensão, alta velocidade de trabalho, oscilação da flutuação dos pneus das máquinas e distância do ponto de correção do sinal RTK.

Há grande potencialidade para o planejamento conservacionista a partir de estratégias de agricultura de precisão, como mapas altimétricos.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa e à UFSM.

REFERÊNCIAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; BLUME, E.Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do sol, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. *33*, n. 2, p. 275-282, 2003. DOI: http://doi.org/10.1590/S0103-84782003000200015.

BRUTI, M. A. **Utilização do sistema John Deere***: surface Water Pró e CR-Campeiro 7 para a obtenção de dados altimétricos para o manejo do arroz irrigado (Oriza sativa)*. 2014. Mestrado (Agricultura de Precisão). *Universidade Federal de Santa Maria*, Santa Maria.

CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: Fundamentos e aplicações. In: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. (Eds.). **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São José dos Campos: INPE, 1998. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf. Acesso em: 30 set. 2024.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. *37*, n. 8, p. 1151-1159, 2002. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000800013.

CECILIO, R. A. **Aplicação da equação de Green-Ampt na modelagem da infiltração de água em Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado.** Viçosa, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

DALLACORT, R.; MORAES, V. R.; ALVES, E. D. L.; COMUNELLO, E.; FIETZ, C. R. Modelos de semivariogramas para análise da variabilidade espacial da precipitação pluvial no Pantanal de Mato Grosso. In: SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS DO PANTANAL. Anais [...] 2012. p. 471-477.

GOMEZ, J.; SOBRINHO, T.; GIRALDEZ, J.; FERERES, E. Soil management effects on runoff, erosion and soil properties in an olive grove of Southern Spain. **Soil & Tillage Research**, v. *102*, n. 1, p. 5-13, 2009. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2008.05.005.

GREGO, C.R.; OLIVEIRA, R. P. de. Conceitos básicos da geoestatística. In: OLIVEIRA, R. P. de; GREGO, C. R.; BRANDÃO, Z. N. (Eds.). **Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o vesper**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2015.

INPE. **TOPODATA:** Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. São José dos Campos, 2010. Disponivel em: http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php. Acesso em: 30 set. 2024.

LLANILLO, R. F.; TELLES, T. S.; SOARES JÚNIOR, D.; PELINNI, T. Tillage systems on annual crops in Brazil: figures from the 2006 Agricultural Census. **Semina: Ciências Agrárias**, v. *34*, n. 6, suppl. 1, p. 3691, 2013. DOI: http://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n6Supl1p3691.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G.The expansion of Brazilian agriculture: soil erosion scenarios. **International**

Soil and Water Conservation Research, v. *1*, n. 3, p. 37-48, 2013. DOI: http://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30029-0.

R CORE TEAM. **R:** *a language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2017.

REICHARDT, K. Infiltração da água no solo. In: REICHARDT, K. (Ed.). **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2. ed. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1996. p. 317-352.

REUTER, H.; NELSON, A.; JARVIS, A. An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data. **International Journal of Geographical Information Science**, v. *21*, n. 9, p. 983-1008, 2007. DOI: http://doi.org/10.1080/13658810601169899.

SEIDEL, E. J.; OLIVEIRA, M. S.Proposta de uma generalização para os modelos de semivariogramas Exponencial e Gaussian. **Semina Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. *34*, n. 1, p. 125-132, 2013. DOI: http://doi.org/10.5433/1679--0375.2013v34n1p125

SOUZA, Z. M.; SOUZA, G. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. **Ciência Rural**, v. *44*, n. 2, p. 261-268, 2014. DOI: http://doi.org/10.1590/S0103-84782014000200011.

UNGER, P. W.; CASSEL, D. K. Tillage implement disturbance effects on soil properties related to soil and water conservation: a literature review. **Soil & Tillage Research**, v. *19*, n. 4, p. 363-382, 1991. DOI: http://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90113-C.

Zoneamentos edafoclimáticos em agricultura de precisão

17

Edaphoclimatic zoning in precision agriculture

José Maria Filippini-Alba[1]

[1] *Pesquisador, Embrapa Clima Temperado, Pelotas (RS), Brasil, jose.filippini@embrapa.br*

RESUMO

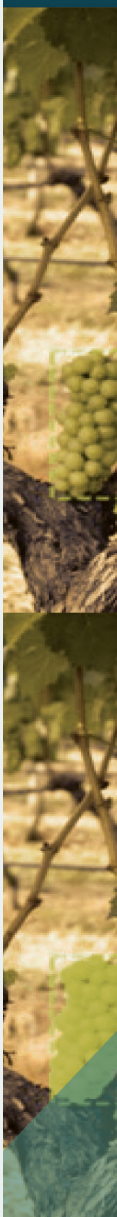
Os zoneamentos edafoclimáticos são instrumentos de ordenamento territorial que consideram áreas de atributos de clima e solo homogêneos, de maneira que a aptidão agrícola pode ser regionalizada. Tradicionalmente, os zoneamentos, assim como o mapeamento de solos, foram desenvolvidos em escala regional. No entanto, na atualidade, ferramentas de agricultura de precisão como o uso de sensores de condutividade elétrica ou ópticos, combinadas com geotecnologias, como sistemas de informação geográfica e veículos aéreos não tripulados, permitem o zoneamento de atributos de clima e solo em escala de propriedade rural. Os zoneamentos edafoclimáticos são discutidos no contexto da agricultura de precisão. Apesar de trabalhar em escalas diferentes, ambos os procedimentos encontram-se associados e podem ser considerados como complementares.

Palavras-chave: agricultura; ordenamento territorial; clima, solo; planejamento; SIG.

ABSTRACT

Zoning of climate and soil is a tool of land use planning considering homogeneous areas of both themes, in the way that the agricultural aptitude is regionalized. Traditionally, zoning and soil mapping have been developed on a regional scale. However, nowadays, precision agriculture tools as electrical conductivity or optical sensors, and geotechnologies, as Geographic Information System (GIS) and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), provide zoning of climate and soil properties in farming scale. Edaphoclimatic zonings are discussed in the Precision Agriculture context. Despite working on different scales, both procedures are associated and can be considered complementary.

Keywords: agriculture; land use planning; climate; soil; planning; GIS.



https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000076

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

A Lei n. 6.938/1981 menciona o zoneamento ambiental como instrumento da Política Nacional do Meio Ambiente, sendo criado o Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama. Essa política tem por objetivo a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar, no país, condições ao desenvolvimento socioeconômico, aos interesses de segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana. No contexto internacional, o zoneamento agroecológico da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) divide os territórios em unidades menores, homogêneas em relação às características climáticas, de relevo, solo e uso da terra (Food and Agriculture Organization, 1996).

O Programa de Garantia da Atividade Agropecuária – Proagro considera o zoneamento agrícola, cuja sustentação científica foi descrita brevemente, considerando as culturas de algodão, arroz, café, feijão, maçã, milho, soja e trigo (Cunha; Assad, 2001). Nessa época aconteceu também a intensificação do uso de sistemas de informação geográfica (SIG) na Amazônia Legal, com suporte do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), visando o ordenamento territorial dessa região.

Porém, foi o Decreto n. 4.297/2002 que estabeleceu as bases do zoneamento ambiental, que foi transformado no Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE). Trata-se de um instrumento de organização do território que direciona a implantação de planos, obras e atividades públicas e privadas, visando à proteção ambiental, dos recursos hídricos, do solo e a conservação da biodiversidade, garantindo o desenvolvimento sustentável e a melhoria das condições de vida da população.

Posteriormente, o Decreto n. 6.288/2007 designou o Poder Público Federal para execução do ZEE, em cooperação com os estados. Também descreveu-se a metodologia básica a ser adotada, envolvendo níveis de informação temáticos para serem processados em SIG, e considerando diversas escalas de trabalho para o ordenamento territorial: escala 1:5.000.000 com referência para 1:1.000.000 no contexto nacional, escalas de 1:250.000 a 1:100.000 nas macrorregiões e territórios estaduais e, finalmente, escalas 1:100.000 e superiores no contexto municipal. A Embrapa Clima Temperado vem trabalhando com zoneamentos edafoclimáticos, que são muito semelhantes aos zoneamentos agroecológicos definidos acima (Food and Agriculture Organization, 1996), para macrorregiões (Filippini-Alba et al., 2020b), no contexto estadual (Filippini-Alba et al., 2014) ou no contexto municipal (Filippini-Alba et al., 2020a).

McBratney et al. (2003) caracterizaram o "mapeamento digital de solos" (MDS), um método de mapeamento que considera o solo como uma função matemática do clima, da atividade biológica, do relevo, do material de origem, da localização e do tempo transcorrido. Existe certa aproximação com a integração de níveis de informação em SIG, mas é necessário um modelo conceitual para fazer que essa integração seja efetivada, pois os dados correspondentes aos perfis de solo são incluídos, derivando em aplicações de inteligência artificial. Os autores mencionaram diversos métodos inseridos no contexto de MDS, como regressão linear, métodos de classificação, lógica fuzzy, árvore de decisão, krigagem, modelo bayesiano e combinações entre eles em ocasiões; incluindo o uso de modelos digitais de elevação e derivados, imagens orbitais, gamametria e fotos aéreas. Como escala de mapeamento preferencial se consideraram as bacias hidrográficas e regiões, isto é, com variação de 1:20.000 a 1:200.000, ou segundo a lei do quarto, ou seja, a porção de território que equivale a um quarto de centímetro quadrado no mapa, o que corresponde a 100 m x 100 m ou 1 km x 1 km nas mencionadas escalas. A ordem 0 de mapeamento do USDA é superior a 1:5.000 e se insere no contexto de agricultura de precisão (AP).

Existem diversas definições para agricultura de precisão (AP), por exemplo:

1) Um conjunto de técnicas que permite o gerenciamento localizado do manejo das culturas (Balastreire et al., 1998).
2) Aplicação de princípios e tecnologias para manejar variabilidade espacial e temporal, associada com todos os aspectos da produção agrícola, com o objetivo de aumentar a rentabilidade e a qualidade ambiental (Pierce; Nowak, 1999, apud Terra, 2012).
3) Aplicar no local correto, no momento adequado, as quantidades de insumos necessários à produção agrícola, para áreas cada vez menores e mais homogêneas, tanto quanto a tecnologia e os custos envolvidos o permitam (Dobermann; Ping, 2004).

Já recentemente, Ammoniaci et al. (2021) mencionam que as bases científicas da AP foram desenvolvidas nos anos 1980 induzidas por quatro fatores principais: 1) custo e precisão dos sistemas globais de navegação por satélite; 2) desenvolvimento de SIG; 3) aumento da disponibilidade de imagens orbitais georreferenciadas; e (4) desenvolvimento da tecnologia de rede variável. A AP é baseada na definição das zonas de manejo, que indicam subáreas com produtividade e limitações agronômicas homogêneas (Doerge,

2022). De certa forma, esse conceito pode ser estendido aos zoneamentos agrícolas em escala regional ou nacional, porém as variáveis envolvidas são diferentes em geral, existindo certa aproximação com a metodologia utilizada, por exemplo o uso de SIG para integração de camadas. Nesse contexto, a AP pode ser relacionada ao conceito de zoneamento em escala de propriedade.

Neste capítulo serão discutidos o potencial e as limitações dos zoneamentos e sua relação com AP, inclusive do ponto de vista de escala, sendo incluídas aplicações no contexto municipal e relacionadas com zoneamentos em escala de propriedade, existindo certa aproximação com a definição de zonas de manejo de uso convencional em AP.

2 PARAMETRIZAÇÃO DOS ZONEAMENTOS

Como mencionado no início, os zoneamentos são direcionados para temas específicos conforme a palavra que complementa o nome, o que define a metodologia utilizada e as classes definidas. Previamente mencionaram-se as leis e decretos que constituíram o marco legal do ZEE, no período 1981-2007, sendo a escala estadual a preferencial, com execução do Poder Público Federal junto aos estados. Vários ZEEs foram executados pelos estados, considerando os seus respectivos territórios: 1) o zoneamento agrícola no contexto do ZEE no norte de Tocantins (Assad et al., 2004); 2) o ZEE da Amazônia Legal considerando as classes "Áreas com estrutura produtiva definida", "Áreas a recuperar", "Áreas frágeis", "Áreas com manejo sustentável" e "Áreas protegidas", mapeadas em escala nacional (Brasil, 2009), por sobreposição de diversos níveis temáticos (Becker; Egler, 1997); ou 3) no caso de Minas Gerais, enfatizando aspectos sociais e considerando os municípios como unidades, não territórios (Pereira et al., 2011), para citar alguns exemplos. Esses processos parecem não ter evoluído a posterior (Brasil, 2022); no entanto, esses zoneamentos, dada sua escala, são de interesse para a gestão dos territórios nacional ou estaduais, sendo necessário aprimorar o grau de detalhamento para avançar nas estratégias territoriais e municipais.

Nos zoneamentos edafoclimáticos são considerados aspectos do clima como horas de frio e percentual de umidade relativa que são processados junto com o relevo e a aptidão do solo para culturas agrícolas específicas, com divisão do território conforme as folhas cartográficas 1:250.000 (Flores; Filippini-Alba, 2015; Filippini-Alba et al., 2020b). As classes definidas relacionam-se com o potencial edafo-climático para cultivos específicos. Em fruticultura é comum a discriminação de cultivares de uma mesma espécie conforme variações de parâmetros climáticos (Wrege et al., 2016).

Flores et al. (2009) descreveram a metodologia do zoneamento edáfico de culturas, quando os solos são classificados conforme sua aptidão edáfica como "Preferencial"," Recomendada", "Pouco Recomendada" e "Não Recomendada" considerando drenagem, grupamento textural, fertilidade, profundidade efetiva, relevo e pedregosidade/rochosidade dos solos para uma dada cultura agrícola (Tabelas 1 e 2). Essa classificação representa um crescimento paulatino do grau de complexidade para o cultivo, quando se passa da condição Preferencial para a Não Recomendada. A fertilidade não varia nesse caso, mas a aptidão Preferencial corresponde à condição alítica para a erva-mate e distrófica para a videira.

Os referidos autores mencionam também que, para levantamentos de solos mais detalhados, as classes de solos componentes das unidades de mapeamento a serem avaliadas tenderão a fornecer maior número de subsídios à interpretação. Com isso, o enquadramento das unidades de mapeamento em uma deter-

Tabela 1. Critérios para definir a aptidão edáfica da ameixeira (*Pronus doméstica* L.) no Rio Grande do Sul.

Parâmetro	Classes de aptidão edáfica			
	NR	Po	R	P
Drenagem	Ruim ou muito ruim	Imperfeita ou excessiva	Moderada	Forte, acentuada ou boa
Profundidade efetiva (cm)	< 50	50-100	100-200	> 200
Textura horizonte B ou C	Orgânica	FArS, FS, FAr, Ar	FAr, AgAr, FAr, Ar	F, FAgAr, FAr, FAg, AgAr, Ag
Declividade (%)	> 75	20-75	8-20	0-8
Fertilidade	Salinidade	Álico	Distrófico	Eutrófico
Pedregosidade e/ou rochosidade (%)	> 15	3-15	0,1-3	< 0,1

NR/Po: Não/Pouco Recomendável; R: Recomendável; P: Preferencial; F: Franco; Ag: Argila ou argilosa; Ar: Areia ou arenosa; S: Siltosa.
Fonte: Flores et al. (2009).

minada classe de aptidão edáfica apresentará maior discriminação e precisão, como exemplo: gleico, abrúptico, plíntico, lítico, léptico etc. Entretanto, para mapas de solos em escalas mais genéricas, onde as unidades de mapeamento são de composições mais heterogêneas, é necessário o agrupamento das unidades de mapeamento em categorias, definindo, em cada uma, classes distintas de utilização, como solos com horizonte latossólico, relevo suave ondulado, tipo de argila, saturação por bases etc.

3 ZONEAMENTOS EM ESCALA MUNICIPAL

Carvalho-Junior (2017) descreveu o Pronasolos, programa nacional de levantamento de solos liderado pela Embrapa Solos (Rio de Janeiro/RJ). Menciona que os mapas de solos em escala de médio e baixo detalhamento, com escala inferior a 1:100.000, cobrem 93% do território nacional; já no contexto municipal, isto é, com escala variando entre 1:50.000 e 1:100.000, cobrem somente 2% do território. Em escala local, semidetalhada, que corresponde a 1:50.000, o território coberto é de 1%. O percentual de cobertura em escala detalhada maior que 1:20.000 é insignificante.

Nas últimas duas décadas, a Embrapa Clima Temperado junto com parceiros desenvolveram mapeamentos de solos em escala municipal, cobrindo uma área de aproximadamente 12.700 km^2, que representam 4,5% do território estadual. Na Figura 1 ilustra-se a diferença de detalhamento envolvido em função da escala de trabalho, pelas unidades de mapeamento e número de classes envolvidas, apesar das

Tabela 2. Critérios para definir a aptidão edáfica da soja (*Glycine max*) no Rio Grande do Sul. Fonte: Flores et al. (2009).

Parâmetro	Classes de aptidão edáfica			
	NR	Po	R	P
Drenagem	Ruim ou excessiva	Imperfeita	Moderada	Forte, acentuada ou Boa
Profundidade efetiva (cm)	< 25	25-50	50-100	> 100
Textura horizonte B ou C	Orgânica	FArS, FS	ArF, FMC, MAr	F, FAgAr, FAr, FAg, AgAr, Ag
Declividade (%)	> 20	13-20	8-13	0-8
Fertilidade	Salinidade	Álico	Distrófico	Eutrófico
Pedregosidade e/ou rochosidade (%)	> 15	3-15	0,1-3	< 0,1

NR/Po: Não/Pouco Recomendável; R: Recomendável; P: Preferencial; F: Franco; Ag: Argila ou argilosa; Ar: Areia ou arenosa; M: Muito; S: Siltosa; C: cascalhenta.

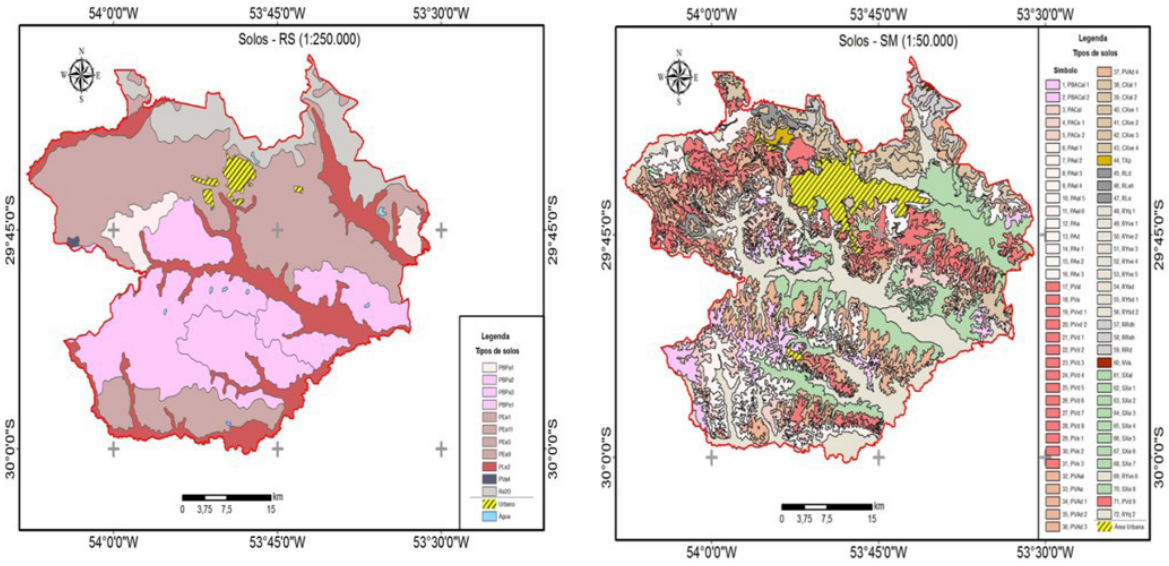


Figura 1. Mapa de solos do município de Santa Maria/RS. Comparação do mapa em escala de trabalho 1:250.000 do Projeto Radam, à esquerda, com o desenvolvido pela Embrapa em escala de trabalho 1:50.000, à direita.
Fonte: Flores; Filippini-Alba (2015).

legendas não serem legíveis. Esse maior detalhamento na escala de levantamento e mapeamento aprimora a precisão do zoneamento na escala municipal, como é demonstrado no caso de Gravataí (Figura 2). No zoneamento em escala 1:250.000 ocorrem quase unicamente duas classes, com a maior parte do território com aptidão Pouco Recomendada. Já no zoneamento em escala 1:50.000 foram mapeadas duas classes com limitações moderadas, ocupando mais da metade do território (cor verde), sendo uma delas com possibilidades de correção (verde escuro).

Considerando imagens orbitais, é possível utilizar a ocupação e o uso da terra para visualizar e quantificar a atividade agrícola municipal (Figura 3). Informações do tipo também podem ser usadas para estudos específicos, como no caso do zoneamento agroecológico florístico para apicultura, baseado na ocupação e uso da terra obtida por meio de imagens Landsat (Filippini-Alba; Wolff, 2016). Observa-se que os estudos apresentados em escala municipal não permitem considerar a variabilidade espacial de lavouras e pomares em escala de propriedade.

4 MICROZONEAMENTOS

MacMillan et al. (2000) caracterizaram um sistema robusto para descrever e segmentar a morfologia terrestre com aplicação direta em AP. O modelo utiliza derivadas computadorizadas do modelo digital de elevação e regras de lógica fuzzy para identificar

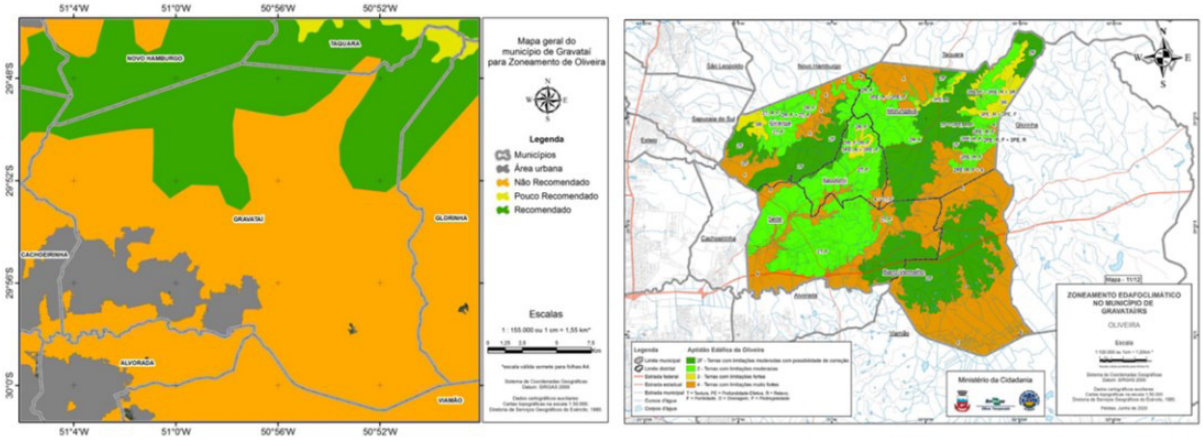


Figura 2. Comparação do zoneamento edafoclimático para a oliveira no município de Gravataí/RS, em escala 1:250.000, à esquerda (Filippini-Alba et al., 2014), com o mesmo zoneamento, mas em escala 1:50.000, à direita (Filippini-Alba et al., 2021). Embrapa Clima Temperado, Pelotas/RS, 2022.

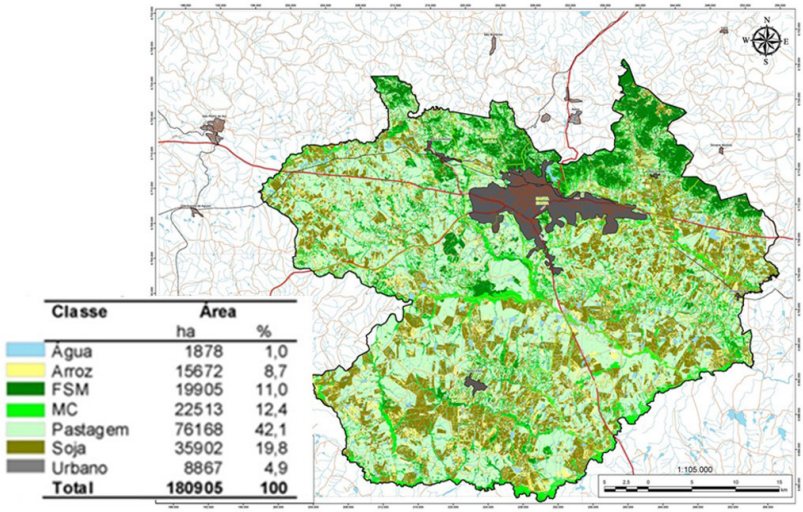


Figura 3. Mapa de ocupação e uso da terra no município de Santa Maria/RS, processado por classificação supervisionada considerando a banda pancromática (pixel de 1,5 m) e as três bandas no visível (pixel de 6 m) da imagem SPOT captada em 20 de abril de 2013. FSM = Floresta submontana; MC = Mata ciliar.
Fonte: Flores; Filippini-Alba (2015).

15 morfologias diferentes. Esse tipo de modelagem de dados poderá evoluir para o contexto de microclima, considerando exemplos já utilizados em escala regional (Weber, 2011), porém com base em modelos digitais gerados por veículos aéreos não tripulados (VANTs), que permitem uma abordagem para propriedade rural, no contexto de AP.

Os zoneamentos edáficos (Flores et al., 2009) consideram vários atributos pedológicos extraídos de mapas de solos em escala que poderá variar do nível nacional até o local. Essa metodologia pode ser contextualizada para escala 1:5.000 ou maior por meio de amostragem superficial ou com trado, considerando uma malha regular ou irregular, o que pode ser denominado de microzoneamento. Os atributos do solo considerados relacionam-se geralmente com declividade, drenagem, fertilidade, textura, pedregosidade e profundidade efetiva. Essas informações são interpoladas e expressas como níveis de informação que podem ser integrados. Uma aplicação com malha regular de 20 m x 20 m em vinhedo localizado em Bento Gonçalves/RS usando interpolação por inverso do quadrado da distância (IDW) é apresentada na Figura 4 e permite comparação com estudo anterior que considerou interpolação por meio de geoestatística (Filippini-Alba et al., 2012).

Observou-se maior ruído dos níveis de informação derivados do erro conhecido como "olho de boi", para a interpolação IDW, devido à existência de valores extremos em distâncias curtas, fato usualmente suavizado pela krigagem. Descartando esse ruído, o resultado final é semelhante ao anterior (Filippini-Alba et al., 2012), estabelecendo um contraste entre Cambissolos e Neossolos, que se manifesta na transição de cores conforme a linha imaginária aproximadamente L-O, que divide a área em duas metades, de maneira aproximada.

A rede de AP da Embrapa fez um esforço para ampliar a aplicação das tecnologias associadas no território brasileiro, sendo os resultados apresentados em 61 estudos envolvendo temas específicos e aplicações (Bernardi et al., 2014). Uma síntese dos resultados apresentados (Tabela 3) sugere que algumas técnicas foram utilizadas em vários estudos, pelos valores da

Tabela 3. Síntese das tecnologias de agricultura de precisão (AP) utilizadas pela rede de pesquisa que desenvolve atividades nesta área, conforme 61 estudos de caso conforme Bernardi et al., 2014. Embrapa Clima Temperado, Pelotas/RS, 2022.

Tema ou tecnologia de AP	Quantidade de estudos	
	Absoluta	Relativa
Geoestatística	25	41%
Estudos sobre a adoção da AP	6	10%
Mapa de solos	5	8%
Mapa de produtividade	17	28%
Modelo digital de elevação	8	13%
Sensoriamento remoto (uso de imagens e VANTs)	7	11%
Sensor de índice de vegetação (*in situ*)	12	20%
Sensor de condutividade elétrica	6	10%
SIG	4	6%

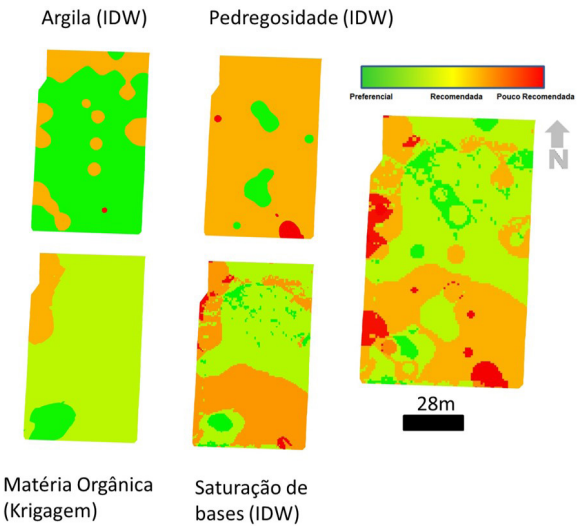


Figura 4. Modelagem SIG por lógica fuzzy com quatro níveis de informação e interpolação predominante por inverso do quadrado da distância (IDW) em vinhedo de Bento Gonçalves/RS.
Fonte: Filippini-Alba et al. (2012).

soma da quantidade de estudos; que o mapeamento do solo foi levado em consideração em poucas ocasiões, sendo substituído por técnicas de mapeamento com sensores e/ou pela modelagem espacial; e, finalmente, que estudos direcionados às plantas foram considerados por pelo menos 48% dos casos (mapa de produtividade e sensor de índice de vegetação). Em termos da análise da variabilidade espacial, a geoestatística foi o procedimento preferencial, superando o uso de imagens orbitais e de SIG. O uso de sensor de índice de vegetação e sensoriamento remoto predominou nas áreas cultivadas com algodão, cana-de-açúcar, grãos e pastagens.

5 CONCLUSÕES

Mapas e zoneamentos em escala de semidetalhe (1:50.000) não permitem analisar a variabilidade espacial das propriedades rurais, assim estão fora do contexto da agricultura de precisão (AP). No entanto, aprimoram as informações de aptidão agrícola obtidas em escala regional, fornecendo fortes subsídios para o ordenamento territorial. Assim, podem ser utilizados como indicativos de áreas com potencial para estudos baseados em AP.

A análise da paisagem é considerada para mapeamento de solos em escala regional e municipal com suporte de sistemas de informação geográfica (SIG). No contexto de AP, o microzoneamento se apresenta como alternativa se orientado pelo modelo digital de elevação, no entanto a amostragem em profundidade não deve ser negligenciada. Destaca-se que no modelo de mapeamento de solo convencional, baseado em perfis, predomina a componente vertical de variabilidade espacial, o que se contrapõem com o conceito de variabilidade espacial usado em AP, onde predomina a componente horizontal; de maneira que ambos os modelos são complementares. O uso do sensor de condutividade elétrica parece ter potencial nesse sentido, dada sua vinculação com a umidade do solo, a textura e o conteúdo de sais e devido a sua condição de mapeamento em duas profundidades.

Diversos padrões tecnológicos podem ser utilizados para executar o modelo digital de elevação ou os monitoramentos: via receptores *in situ*, por meio de veículos aéreos não tripulados (VANTs), sensoriamento remoto ou robótica. No entanto, em ocasiões os recursos financeiros devem ser analisados com cuidado, de maneira a adaptar as tecnologias, considerando o tamanho ideal de 20 ha, do ponto de vista da sustentabilidade econômica, conforme Ammoniaci et al. (2021) para viticultura de precisão, que poderá ser ajustado para outras culturas.

REFERÊNCIAS

AMMONIACI, M.; KARTISIOTIS, S. P.; PERRIA, R.; STORCHI, P. State of art of monitoring Technologies and Data Processing for precision viticulture. **Agriculture**, v.11, n. 3, p. 201-220. 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/agriculture11030201.

ASSAD, E. D.; PINTO, A. C. Q.; ASSAD, M. L. L.; EVANGELISTA, B. A.; MOREIRA, L.; BEZERRA, H. S.; CARDOSO, E. A. **Projeto de Gestão Ambiental Integrada da Região do Bico do Papagaio**. Zoneamento Ecológico-Econômico. Zoneamento Agrícola do Norte do Estado do Tocantins. Palmas: Seplan, 2004. 160 p.

BALASTREIRE, L. A.; ELIAS, I. A.; AMARAL, J. R. Agricultura de precisão: mapeamento da produtividade da cultura do milho. **Engenharia Rural**, v. 8, n. 1, p. 97-111, 1998.

BECKER, B.; EGLER, C. **Detalhamento da metodologia para execução do zoneamento ecológico-econômico pelos Estados da Amazônia Legal**. Brasília: MMA, 1997.

BERNARDI, A. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. **Agricultura de Precisão:** resultados de um novo olhar. Brasília: Embrapa, 2014, 598p.

BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2009. **Mapa integrado dos zoneamentos ecológico-econômicos--econômicos dos estados da Amazônia Legal:** situação atual. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/estruturas/225/_imagens/mapa_estados_integrados_225.jpg. Acesso em: 01 jun. 2022.

BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2022. **Zoneamento Ecológico-Econômico**. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/gestao-territorial/zoneamento-territorial/item/8186.html. Acesso em: 02 jun. 2022.

CARVALHO-JUNIOR, W. PronaSolos. Programa Nacional de Solos do Brasil. Programa Nacional de Levantamento e Interpretações de Solos do Brasil In: SIMPÓSIO MINEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 4., 2017, Viçosa. **SMCS**. Viçosa: Embrapa Solos, 2017. Acesso em: 01/06/2022. Disponível em: https://smcs.ufv.br/wp-content/uploads/2017/05/03WALDIRCARVALHO.pdf

CUNHA, G. R.; ASSAD, E. D. Uma visão geral do número especial da revista brasileira de agrometeorologia sobre zoneamento agrícola no brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, p. 377-385, 2001.

DOBERMANN, A.; PING, J. L. Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps. **Agronomy Journal**, v. 96, n. 1, p. 285-297, 2004. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj2004.2850.

DOERGE, T. A. **Site-specific management guidelines**, 2022. Disponível em: http://www.ipni.net/publication/ssmg.nsf/0/C0D052F04A53E0BF852579E500761AE3/$FILE/SSMG-02.pdf. Acesso em: 01 jun. 2022.

FILIPPINI ALBA, J. M.; MIGUEL, P.; ALMEIDA, I. R.; BUENO, J. M. M.; NACHTIGALL, S. D.; PAGANI JUNIOR, A.; LEIDEMER, J. D. **Levantamento de solos e zoneamento edafoclimático de culturas do município de Marau - RS**. Brasília: Embrapa, 2020ª. 159 p.

FILIPPINI ALBA, J. M.; MIGUEL, P.; ALMEIDA, I. R.; BUENO, J. M. M.; NACHTIGALL, S. D.; PAGANI JUNIOR, A.; LEIDEMER, J. D. **Zoneamento edafoclimático de culturas agrícolas no município de Gravataí, RS**. Pelotas: Embrapa, 2021. 36 p.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; FLORES, C. A.; WREGE, M. S. **Zoneamento edafoclimático da olivicultura para o Rio Grande do Sul.** Brasília: Embrapa, 2014. 68 p.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; WREGE, M. S.; ALMEIDA, I. R.; MARTINS, C. R.; ZEMNICAHAK, S.; SOUZA, T. G. **Zoneamento edafoclimático da nogueira-pecã para o Sul do Brasil**. Pelotas: Embrapa, 2020b. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1126889/zoneamento-edafoclimatico-da-nogueira-peca-para-a-regiao-sul-do-brasil. Acesso em: 20 jun. 2020.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; FLORES, C. A.; MIELE, A. Modelagem espacial dos solos para apoio à viticultura de precisão: Vale dos Vinhedos, Serra Gaúcha, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Viticultura e Enologia**, v. 4, p. 8-17, 2012.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; WOLFF, L. F. **Zoneamento agroecológico e florístico para a apicultura e meliponicultura no bioma Pampa**. Pelotas: Embrapa, 2016. 98 p.

FLORES, C. A.; FILIPPINI-ALBA, J. M. **Zoneamento edáfico de culturas para o município de Santa Maria/RS**. Brasília: Embrapa, 2015. 309 p.

FLORES, C. A.; GARRASTAZÙ, M. C.; FILIPPINI-ALBA, J. M. 2009. **Metodologia de zoneamento edáfico de culturas para o estado do Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa, 2009. 45 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **Agro-ecological Zoning**. Guidelines. Roma: FAO, 1996. Disponível em: https://www.fao.org/3/w2962e/w2962e00.htm#P-2. Acesso em: 27 mai. 2022.

MACMILLAN, R. A.; PETTAPIECEB, W. W.; NOLANC, S. C.; GODDARD, T. W. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 113, n. 1, 81-109, 2000. DOI: http://doi.org/10.1016/S0165-0114(99)00014-7.

MCBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003. DOI: http://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4.

PEREIRA, J. R.; FERREIRA, P. A.; VILAS-BOAS, A. A.; OLIVEIRA, E. R.; CARDOSO, R. F. Gestão social dos territórios da cidadania: o zoneamento ecológico-econômico como instrumento de gestão do território noroeste de Minas Gerais. **Cadernos EBAPE.BR**, v. 9, n. 3, p.724-747, 2011.

TERRA, V. S. S. **Variabilidade especial e temporal de atributos agronômicos em pomar de pessegueiro**. 2012. Tese (Programa de Pós-graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

WEBER, E. **Estimativa e mapeamento da radiação solar incidente em superfícies com topografia heterogênea na zona de produção vitivinícola Serra Gaúcha**. 2011. Tese (Pós-graduação em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. 145 p.

WREGE, M. S.; FAORO, I. D.; HERTER, F. G.; PANDOLFO, C.; ALMEIDA, I. R.; FILIPPINI ALBA, J. M.; PEREIRA, J. F. M. Agroclimatic zoning of European and Asian pear cultivars with potential for commercial planting in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 39, n. 2, p. 11, 2016.

Mapeamento digital de solos e a agricultura de precisão

18

Digital Soil Mapping and Precision Agriculture

Stefan Domingues Nachtigall[1], Pablo Miguel[2], Jéferson Diego Leidemer[3], José Maria Filippini-Alba[4]

[1] *Doutorando, Faculdade Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Capão do Leão (RS), Brasil, stefan.tefo@gmail.com*
[2] *Professor, Faculdade Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Capão do Leão (RS), Brasil, pablo.ufsm@gmail.com*
[3] *Mestrando, Faculdade Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Capão do Leão (RS), Brasil, jeferson.leidemer@gmail.com*
[4] *Pesquisador, Embrapa Clima Temperado, Laboratório de Planejamento Ambiental, Pelotas (RS), Brasil, jose.filippini@embrapa.br*

RESUMO

A partir do início da era digital, o mapeamento de solos foi se modernizando com características mais determinísticas e probabilísticas, de acordo com modelos matemáticos para classificar e avaliar classes e atributos do solo, organizando-se no que conhecemos como mapeamento digital de solos. De forma análoga, a agricultura de precisão utiliza um conjunto de tecnologias da informação que possibilitam benefícios diretos ao minimizar perdas e gastos. Dentre as tecnologias da informação, as técnicas de aprendizado de máquina ou *machine learning* permitem aprimorar o detalhamento da variabilidade espacial nas propriedades agrícolas. Assim, a modelagem de dados considerando mapeamento digital de classes de solos ou simulação de atributos pedológicos por meio de inovações tecnológicas, utilizando grande quantidade de dados provenientes de aeronave remotamente tripulada ou de espectrorradiômetros terrestres, bem como de sistemas de informação geográfica e sensores de contato, oferecem alternativas para trabalhar em escala de propriedade, direcionando as pesquisas em agricultura de precisão, com forte tendência à evolução para agricultura digital.

Palavras-chave: agricultura digital; SIG; drones; aeronave remotamente tripulada (ARP); sensoriamento remoto.

ABSTRACT

Since the beginning of the digital age, soil mapping has been changing the way we model data, with more deterministic and probabilistic features, employing mathematical models to classify and evaluate pedological classes and attributes, organized around what we know today as Digital Soil Mapping. Similarly, Precision Agriculture employs a set of information technologies which provide direct benefits through minimizing losses and expenses. Among information technologies, machine learning techniques provide a better approach about spatial variability within farming contexts. As such, data modeling considering digital mapping of soil classes or simulated pedological attributes through technological innovations, using a large quantity of data obtained from unmanned aerial vehicles or from spectroradiometry data managed by geographic information systems and contact sensors, appears to be adequate options for farm scale. Thus, researches related to precision agriculture are strongly directed towards digital agriculture.

Keywords: digital agriculture; GIS; drones; unmanned aerial vehicle (UAV); remote sensing.

1 INTRODUÇÃO

O mapeamento digital de solos (MDS) distingue-se do mapeamento convencional de solos (MCS) pois propõe uma segmentação da paisagem em diversas covariáveis ambientais. O MDS procura expressar a paisagem por meio de valores quantitativos que possam fornecer métricas para o modelo classificador ser treinado e validado com base em observações de campo. Em contrapartida, o MCS aborda a paisagem por meio do observador especialista, realizando inferências balizadas nas informações que estão visivelmente disponíveis na paisagem e nas relações entre fatores de formação conhecidos.

A capacidade do MDS de estratificar diversas camadas de informação na paisagem fornece ao usuário uma infinidade de dados que podem ser usados para melhorar o entendimento quanto aos fatores

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000074

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

de formação e variação espacial em atributos do solo. Além disso, pode-se desenvolver a avaliação da incerteza relacionada à predição de classe ou atributo com o uso de métricas como o desvio padrão, intervalo de predição, coeficiente de determinação (R^2), erro quadrático médio, pureza teórica, entropia de Shannon e índice de confusão.

O modelo base de MDS utilizado na pedometria foi apresentado por McBratney et al. (2003), que generalizaram e formularam as abordagens originais. A função gerada é baseada na abordagem de Jenny, considera sete fatores como preditores do solo e é comumente conhecida como modelo SCORPAN, em que: S é a informação prévia do atributo ou classe do solo; C refere-se às informações climáticas; O representa a interação dos organismos com o solo, seja pela vegetação, fauna ou pela atividade humana; R é a representação do relevo; P é o material parental; A é o fator que considera o tempo; e N é o fator que considera a posição espacial. Os autores revisaram 66 trabalhos relacionados com MDS no período 1964-2003, envolvendo vários países, considerando a avaliação de conteúdo de argila ou silte, profundidade de camada, armazenamento de água, teor de matéria orgânica ou de alguns elementos químicos como C, Mn e P. A krigagem, a regressão linear, os métodos de classificação, a análise em componentes principais e as lógicas fuzzy ou bayesiana foram consideradas para processar as informações. Assim, se o modelo de análise de paisagem convencional baseia-se em raciocínio dedutivo-nomológico, SCORPAN poderia ser considerado um novo paradigma relacionado com um modelo dedutivo-estatístico com orientação para procedimentos de informação digital, computação, sistemas de informação geográfica e redes neurais. Destaca-se que 85% dos estudos revisados envolveram o uso de formas de relevo para mapeamento do solo em escala 1:10.000 a 1:20.000.

Nos solos brasileiros, o primeiro trabalho a abordar o uso do MDS na estimativa de classes de solo foi o de Giasson et al. (2006), no qual se destaca a indisponibilidade de informações detalhadas ou semidetalhadas e a possibilidade do uso de abordagens com maior custo-benefício para reverter essas condições. Há uma ampla margem para o avanço da relação de agricultura de precisão com mapeamento digital no Brasil em função da alta capacidade produtiva dos solos e a tecnologia agregada ao sistema produtivo de grãos. Portanto, existe a iniciativa de inserir ferramentas que estão na fronteira do avanço científico e tecnológico, induzindo aprimoramento metodológico e avanço de conhecimento na agricultura brasileira.

Um procedimento robusto de caracterização de formações geomorfológicas que pode ser aplicado diretamente à agricultura de precisão foi desenvolvido no Canadá por meio de subprodutos de modelo digital de elevação avaliado por meio de imagens do sensor Aster, que está embarcado em plataforma orbital construída por projeto de cooperação entre Japão e EUA (NASA, 2004), ou considerando o levantamento da *Shuttle Radar Topographic Mission* (USGS, 2020). Foi considerada uma regra baseada em lógica fuzzy baseada em 15 diferentes variáveis topográficas, como elevação, declividade, aspecto, rugosidade, orientação etc., que permitem definir diversas estruturas: achatamento, pico, poço, cume, ombro, encosta, esporão e vale (Amatulli et al., 2018). Muito embora técnicas de agricultura de precisão devam trabalhar em escala detalhada, alcançando dimensões métricas ou decamétricas.

Neste capítulo são discutidos os conceitos de mapeamento digital de solos (MDS) e de agricultura de precisão (AP), levando em consideração a relação entre ambos, assim como aspectos relacionados à escala de trabalho. Trata-se de conceitos de natureza inovadora que têm modificado a agricultura e as diversas metodologias associadas.

2 MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS

O MDS pode abordar a estimativa de unidades de mapeamento a partir de covariáveis ambientais correlacionadas a perfis do solo e pontos de observação de campo que fornecem os dados de validação das estimativas. Mas existe a possibilidade de o especialista usar seus conhecimentos para selecionar covariáveis e, a partir disso, aumentar a precisão das estimativas em áreas de paisagens complexas na região sul (Moura-Bueno et al., 2019). Os resultados avaliados indicaram que o especialista é capaz de aumentar o desempenho do conjunto de covariáveis dos modelos na predição de classes de solo em paisagens complexas. Além disso, o modelo *random forest* destacou-se dentre os modelos analisados, isto é, a árvore de decisão, a regressão logística múltipla e o *support vector machine* (SVM). Trata-se de um sistema de aprendizado de máquina (*machine learning*). O *random forest* cria várias árvores de decisão de maneira aleatória, em que cada árvore será utilizada na escolha do resultado final, conforme uma espécie de votação (Didática Tech, 2022).

No Brasil, o mapeamento digital do teor de carbono orgânico do solo (COS) está intimamente ligado ao baixo custo da determinação e alto impacto na agricultura. Padilha et al. (2020) propuseram que os da-

dos espectrais das bandas do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas do sensor Landsat 8/OLI fossem utilizados associados a dados de argila do solo para estimar o teor de COS por meio de uma regressão linear múltipla. Os estudos foram conduzidos no estado de São Paulo com 218 pontos de amostras de *Oxisols* e *Ultisols*. Concluiu-se que a estimativa do teor de COS é sensível a variáveis relacionadas a índices de vegetação. Além disso, a regressão linear múltipla se mostrou eficiente e com baixo custo para áreas de grandes extensões. Ressalta-se ainda que, por se basear em imagens de sensores orbitais, essas estimativas representam um recorte temporal do cenário observado, podendo variar conforme o momento do ano e cobertura do solo.

Com a praticidade do MDS utilizar informações diversas em seu processo de treinamento, novos dados começaram a ser englobados e analisados. Uma das alternativas para expandir as técnicas que contribuem para melhor caracterização dos solos é a espectroscopia, na forma de assinaturas espectrais dos solos. Bellinaso et al. (2010) formularam uma biblioteca espectral de solos agrícolas do Brasil utilizando amostras de diferentes horizontes em diversos municípios dos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e Goiás, totalizando amostras de 233 perfis de solos descritos. Com as amostras, traçou-se a assinatura espectral entre 350 e 2.500 nm. Com esses dados, os autores conseguiram encontrar padrões espectrais para argilominerais 2:1, óxidos de ferro, hematita, goethita, gipsita, além de outros atributos dos solos e, a partir disso, diferenciar e inferir as classes de solos em primeiro nível categórico.

As pesquisas envolvendo a estimativa do carbono orgânico do solo (COS) têm-se ampliado consideravelmente. O COS é um produto direto que expressa sua importância na agricultura e está diretamente relacionado com as alternativas de manejo, sendo muitas vezes priorizado em relação a mapas de classes de solo ou demais atributos. Tem-se ainda a preocupação direta com as questões climáticas ligadas à liberação de carbono na atmosfera. Estima-se que a quantidade de carbono armazenado no solo é superior ao carbono armazenado na fitomassa e atmosfera somados (Scharlemann et al., 2014).

Heil et al. (2020) utilizaram fotos digitais para analisar a variabilidade do carbono e óxidos de ferro em trincheiras de aproximadamente 1,75 m de profundidade com fotografias na resolução espacial de 1 mm^2 e abrangendo 33 pixels nas dimensões X e Y. Os autores obtiveram resultados positivos para o mapeamento de carbono em alta resolução, difundindo o uso de sensores mais baratos e com maior resolução para mapeamento em perfis de solo com carbono e ferro (Fe). Também apontaram a capacidade de utilizar todos os benefícios do MDS para estimar a incerteza a os teores dos elementos analisados.

Li et al. (2019) utilizaram raios gama (γ) para determinar a relação entre Ca, Mg e o comprimento de onda desses raios, para assim comparar os resultados entre modelos preditivos e incertezas estimadas. A partir dessas análises, os autores puderam concluir que foi possível estabelecer relação até 15 cm de profundidade. A krigagem de regressão foi o modelo mais preciso, menos tendencioso e com boa concordância; quanto ao modelo linear misto, a precisão e tendência também foram positivas, mas a concordância foi negativa. Esses resultados também foram expressivos para ambos os elementos analisados (Ca e Mg), mostrando a similaridade com que o MDS consegue tratar elementos com dinâmicas similares.

3 AGRICULTURA DE PRECISÃO

Uma parte das tecnologias de AP se baseia em conceitos de manejo localizado de lavouras, utilizando técnicas de posicionamento espacial, geoestatística e *machine learning*. Através do emprego de técnicas dessas áreas é possível entender e prescrever as alternativas mais diretas às demandas locais, observando cada local com a sua devida particularidade. A inserção de novas tecnologias possibilita que a AP se modernize cada vez mais, e essa característica permite o aumento da produtividade e equalização de produção entre as áreas da lavoura (Silva; Silva-Mann, 2020).

Segundo Filippini-Alba e Zanella (2016), existem diversas maneiras de definir AP, porém há uma tendência de evolução, no tempo, do conceito de "manejo" para o de "gestão" (postura gerencial), sendo que a maior parte das definições menciona, de maneira direta ou indireta, a expressão "variabilidade espacial ou temporal". Destaca-se ainda a utilização de conceitos como insumos, produção agrícola, qualidade ambiental e rentabilidade, que estabelecem forte conexão com a sustentabilidade. Assim, na tentativa de agrupar todas as definições, pode-se considerar o conceito "conjunto de ferramentas tecnológicas para o controle do manejo, dos gastos e produtividade, integrando um sistema de gestão que considera as variabilidades de espaço e tempo na influência dos rendimentos dos cultivos, visando à sustentabilidade".

Stafford (2000) aponta o GPS (*Global Positioning System*) como a tecnologia que impulsionou o desenvolvimento do conceito de AP nos anos de 1970, possibilitando determinar a posição (latitude, longitude

e altitude) em qualquer lugar. Com essa informação, máquinas agrícolas podem operar em local estabelecido no campo. No Brasil, apenas no início dos anos 2000 ocorreu a disponibilização de colhedoras com GPS e sensor de produtividade, porém não houve grande adoção por parte dos produtores, justificada pela dificuldade de processamento dos dados e, até mesmo, falta de percepção da utilidade dos mapas de produção (Resende et al., 2010).

Para que a agricultura de precisão possa ser implementada com eficiência é imprescindível que as propriedades agrícolas possuam uma base de informações adequada. Nesse sentido, a capacidade de conhecer as propriedades do solo em pontos equidistantes em escala de centímetros ou poucos metros é inestimável, podendo manipular as particularidades de cada propriedade e modelar as abordagens com mais eficiência. As plataformas para gerar as informações de que a AP se utiliza desenvolveram-se com bastante eficácia nos últimos anos, possibilitando que a transferência nos avanços de softwares e métodos de análise seja anexada aos avanços das AP. De forma análoga, as informações disponibilizadas por câmeras multiespectrais que podem ser anexadas em plataformas de voo se tornaram acessíveis e permitem escalas de trabalho com melhor resolução.

Bolfe et al. (2020) descreveram a agricultura digital como uma tecnologia próxima à AP, estabelecendo a aproximação com conceitos como *big data*, drones ou aeronaves remotamente tripuladas (ARP), internet das coisas, *machine learning* e *blockchain,* que se agregam às expressões mais tradicionais, como automação, GPS, sensores, sensoriamento remoto e SIG, que estavam vinculadas com a AP nas origens, revelando a significativa natureza tecnológica envolvida. De certa forma, o MDS se inclui nesse roteiro.

4 ESCALAS DE TRABALHO

Quanto às escalas disponíveis no ambiente da agricultura de precisão, existem diversas fontes de informação, por consequência, diversas escalas de trabalho. Nos modelos digitais de elevação (MDE), o padrão de informação com resolução espacial de 30 m é o SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission* (Farr et al., 2007), amplamente utilizado para prover informações a nível municipal, estadual e de bacias hidrográficas (Chagas et al., 2010; Teske et al., 2014; Filippini Alba et al., 2020). Contundo, a resolução espacial desse tipo de informação compromete a qualidade e aplicabilidade da agricultura de precisão, visto que não permite a correta interpretação das feições do terreno e variabilidade de altimetria da área em escala de propriedade.

Buscando a obtenção de modelos digitais de elevação com melhor resolução espacial, aeronaves remotamente pilotadas (ARP) apresentam plataforma de voo com ótimo custo-benefício e capacidade de atender as demandas na escala de propriedades rurais. Além disso, a geração de MDEs com alta resolução espacial é praticamente rotineira, quando associada à precisão dos receptores do tipo *Global Navigation Satellite System* (GNSS).

Com base nas Figuras 1A e 1B, é notável a diferença na resolução das imagens levantadas com auxílio de ARP e GNSS. A capacidade de detalhamento e informações derivadas (declividade, índice de umidade do relevo, fluxo acumulado, direção de fluxo etc.) torna a identificação de zonas homogêneas mais precisa e agrega valor ao uso da AP. Enquanto as informações disponíveis mais tradicionais como o SRTM (Figura 1B e Figura 1D) possuem uma resolução espacial de 30 m e generalizam áreas importantes dentro de uma propriedade rural sem ganhos consideráveis ou justificáveis ao trabalhar em escalas de propriedade.

No tocante ao planejamento estratégico e informações espectrais, o avanço nos sensores aerotransportados possibilita que as características da cobertura e cor do solo sejam captadas de forma clara e precisa, indicando as posições e variações dos tipos de solo e sugestões sobre o manejo da área. Através da Figuras 2A a 2D é possível observar a diferença significativa entre as resoluções espaciais da plataforma de imageamento do satélite LandSat 8 e do produto com o mosaico das ortofotos geradas por um ARP numa propriedade rural.

Quanto ao mapeamento de atributos do solo, o carbono orgânico do solo (COS) é essencial para a caracterização química das áreas produtivas e tem implicações diretas, nas questões climáticas, com o estoque de carbono do solo e créditos de carbono. Portanto, o uso de tecnologias que propiciem grandes detalhamento nesse tipo de mapeamento agrega valor aos produtos associados posteriormente na AP.

Utilizando-se amostragens de COS associadas ao produto cartográfico gerado por ARP e determinação de pontos de controle com GNSS é possível avaliar o conteúdo de COS com variação de 0,08 m (Figura 3A), gerando-se grades com valores desse atributo. Além disso, com a incerteza (Figura 3B) que representa o coeficiente de variação de cada pixel, é possível determinar as áreas onde o COS está com maior precisão e acurácia. Esses dados podem posteriormente ser associados a zonas de manejo ou delimitação de glebas e áreas experimentais.

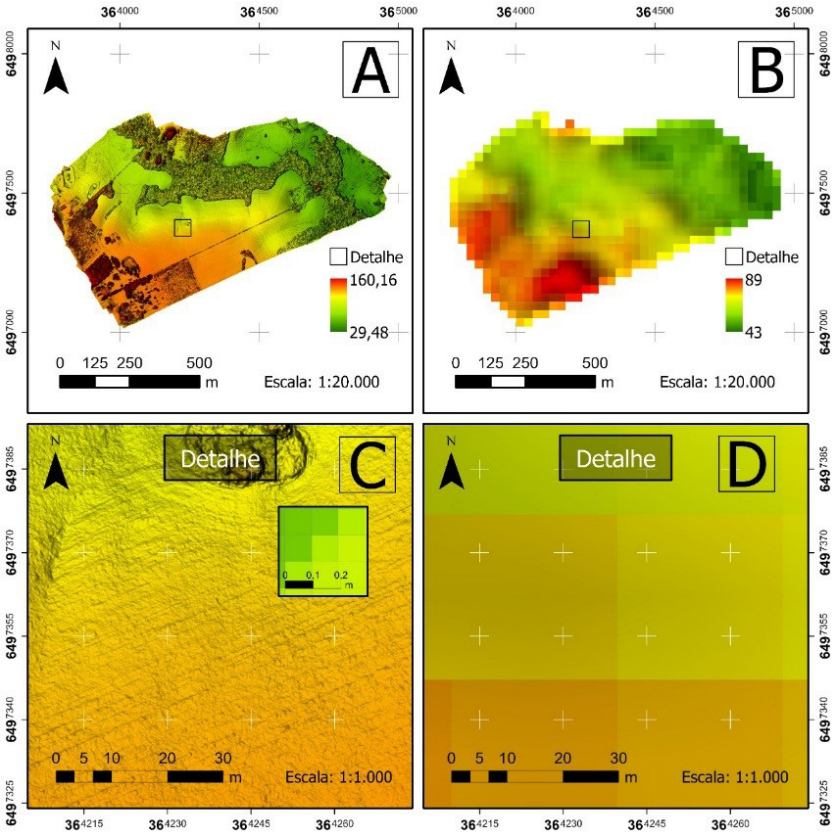


Figura 1. A) Modelo digital de elevação gerado por levantamento planialtimétrico com veículo aéreo não tripulado (ARP), com resolução espacial de 0,08 m. B) Modelo digital de elevação (MDE) proveniente do SRTM, com resolução espacial de 30 m. C) Área de detalhe do MDE com resolução de 0,08 m. D) Área de detalhe do MDE com resolução espacial de 30 m, oriunda do SRTM.

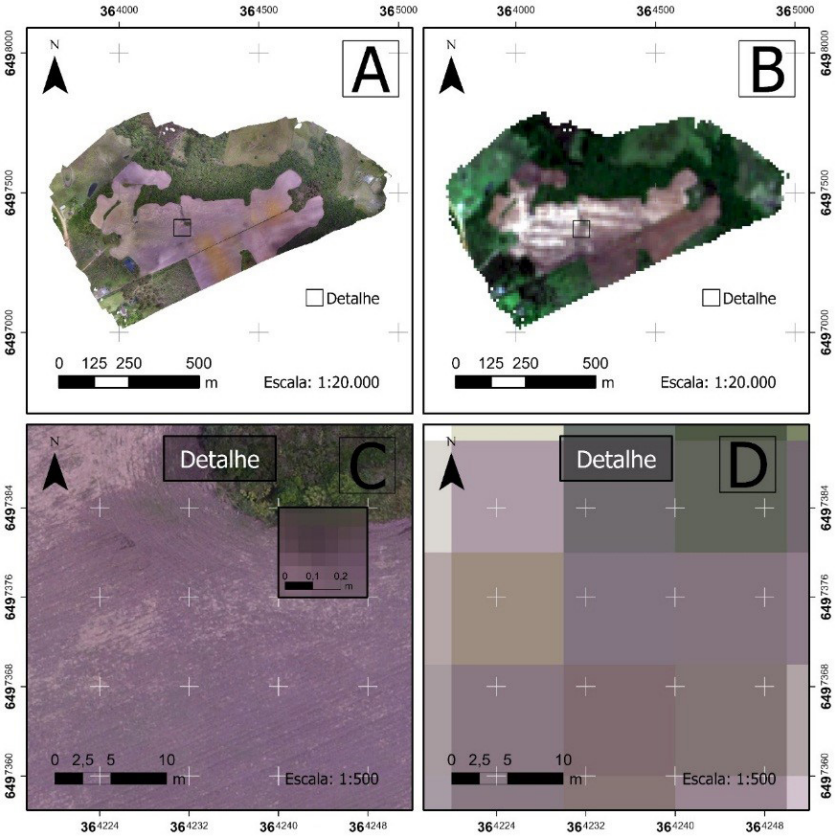


Figura 2. A) Ortofotos com resolução espacial de 0,08 m geradas através de ARP. B) Imagem LandSat 8/OLI com resolução espacial de 30 m. C) Detalhe da ortofoto gerada com ARP. D) Detalhe da imagem orbital LandSat 8/OLI.

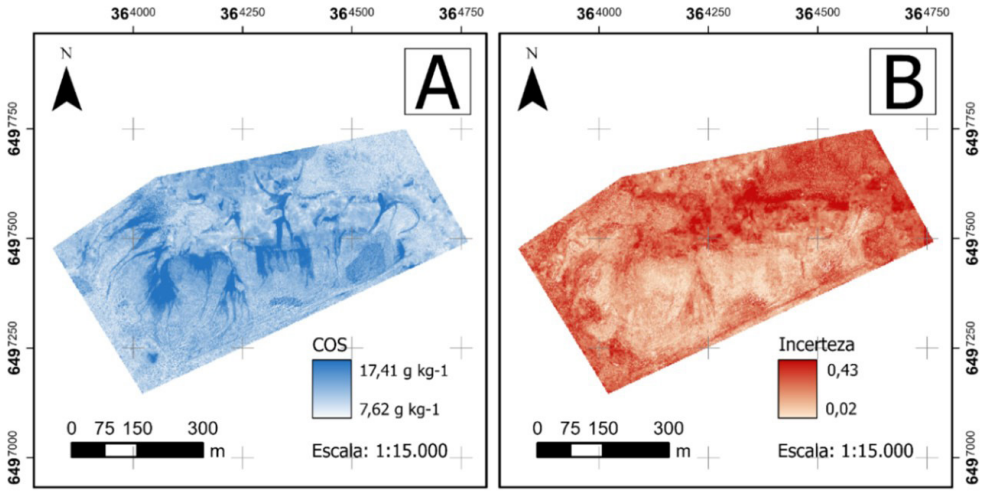


Figura 3. A) Mapeamento digital de carbono orgânico do solo. B) Incerteza associada ao mapeamento digital.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o exposto, percebe-se que a agricultura de precisão nasce como uma proposta inovadora dos métodos da agricultura tradicional, promovendo o conhecimento de parâmetros locais e espacializados das propriedades agrícolas. Nesse sentido, a AP deve continuar explorando a fronteira do conhecimento científico e promovendo o uso de tecnologias inovadoras como os ARPs no mapeamento digital de solos para embasar e assegurar a informação de qualidade dimensionada nas escalas de propriedade.

A adaptação do mapeamento digital de solos para a escala de propriedade tem muito a contribuir com a agricultura de precisão, levando em conta o avanço das tecnologias de mapeamento nessa escala, como os ARPs, a espectroradiometria, que supera as imagens de sensoriamento remoto convencionais por satélite, principalmente devido à resolução espectral. Isso, de certa forma, representa uma diminuição da qualidade das medições, que é compensada por meio do levantamento de grande fluxo de dados, de maneira a produzir mapeamentos espacialmente precisos para definição das zonas de manejo. Com base nesse fluxo de informações sustentado pela conectividade, pelos sistemas de posicionamento global e pela tecnologia da informação, que associa-se com os sistemas de informação geográfica, com o *machine learning* e os aplicativos para celulares, há uma evolução irrestrita para a agricultura digital.

REFERÊNCIAS

AMATULLI, G.; DOMISCH, S.; TUANMU, M.; PARMENTIER, B.; RANIPETA, A.; MALCZYK, J.; JETZ, W. Data Descriptor: a suite of global, cross-scale topographic variables for environmental and biodiversity modeling. **Scientific Data**, v. 5, p. 180040, 2018.

BELLINASO, H.; DEMATTÊ, J. A. M.; ROMEIRO, S. A. Soil spectral library and its use in soil classification. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 3, p. 861-870, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/s0100-06832010000300027.

BOLFE, E. L.; JORGE, L. A. C.; SANCHES, I. D.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; COSTA, C. C.; VICTORIA, D. C.; INAMASU, R. Y.; GREGO, C. R.; FERREIRA, V. R.; RAMIREZ, A. R., Precision and digital agriculture: adoption of technologies and perception of Brazilian farmers. **Agriculture**, v. 10, n. 12, p. 653-668, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture10120653.

CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; ROCHA, M. F.; CARVALHO JÚNIOR, W.; SOUZA NETO, N. C. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 218-226, 2010.

DIDÁTICA TECH. **O que é e como funciona o algoritmo RandomForest**, 2022. Disponível em: https://didatica.tech/o-que-e-e-como-funciona-o-algoritmo-randomforest/. Acesso em: 4 out. 2022.

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SCHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The shuttle radar topography mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, p. RG2004, 2007. DOI: https://doi.org/10.1029/2005RG000183.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; MIGUEL, P.; ALMEIDA, I. R.; MOURA-BUENO, J. M.; NACHTIGALL, S. D.; PAGANI-JUNIOR, A.; LEIDEMER, J. D. **Levantamento de solos do município de Marau e zoneamento edafoclimático de culturas**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2020. Disponível em: www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1126487/levantamento-de-solos-e-zoneamen-

to-edafoclimatico-de-culturas-do-municipio-de-marau---rs. Acesso em: 30 ago. 2022.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; ZANELLA, M. A. **Revisão e processamento de informações sobre agricultura de precisão no Brasil**. Pelotas: Embrapa, 2016. 20 p. (Embrapa Clima Temperado, Documentos, 416).

GIASSON, E.; CLARKE, R. T.; INDA JUNIOR, A. V.; MERTEN, G. H.; TORNQUIST, C. G. Digital soil mapping using multiple logistic regression on terrain parameters in southern Brazil. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 3, p. 262-268, 2006. DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000300008.

HEIL, J.; MARSCHNER, B.; STUMPE, B. Digital photography as a tool for microscale mapping of soil organic carbon and iron oxides. **Catena**, v. 193, p. 104610, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104610.

LI, N.; ZHAO, X.; WANG, J.; SEFTON, M.; TRIANTAFILIS, J. Digital soil mapping based site-specific nutrient management in a sugarcane field in Burdekin. **Geoderma**, v. 340, p. 38-48, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.033.

MCBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4.

MOURA-BUENO, J. M.; DALMOLIN, R. S. D.; HORST-HEINEN, T. Z.; CANCIAN, L. C.; SCHENATO, R. B.; DOTTO, A. C.; FLORES, C. A. Prediction of soil classes in a complex landscape in Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 54, p. e00420, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/S1678-3921.PAB2019.V54.00420.

NASA. **Aster**. Washington, DC: NASA, 2004. Disponível em: https://asterweb.jpl.nasa.gov/. Acesso em: 4 out. 2022.

PADILHA, M. C. C.; VICENTE, L. E.; DEMATTÊ, J. A. M.; LOEBMANN, D. G. S. W.; VICENTE, A. K.; SALAZAR, D. F. U.; GUIMARÃES, C. C. B. Using Landsat and soil clay content to map soil organic carbon of oxisols and Ultisols near São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 21, p. e00253, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00253.

RESENDE, A. V.; SHIRATSUCHI, L. S.; COELHO, A. M.; CORAZZA, E. J.;VILELA, M. F.; INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C.; BASSOI, L. H.; NAIME, J. M. Agricultura de precisão no Brasil: avanços, dificuldades e impactos no manejo e conservação do solo, segurança alimentar e sustentabilidade. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 18., 2010, Teresina. **Novos caminhos para agricultura conservacionista no Brasil: anais**. Teresina: Embrapa Meio-Norte/Universidade Federal do Piauí, 2010.

SCHARLEMANN, J. P. W.; TANNER, E. V. J.; HIEDERER, R.; KAPOS, V. Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. **Carbon Management**, v. 5, n. 1, p. 81-91, 2014. DOI: https://doi.org/10.4155/cmt.13.77.

SILVA, W. V. R.; SILVA-MANN, R. Agricultura de Precisão no Brasil: conjuntura atual, desafios e perspectivas. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, 2020. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v9i11.9603.

STAFFORD, J. V. Implementing precision agriculture in the 21st century. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 76, n. 3, p. 267-275, 2000.

TESKE, R.; GIASSON, E.; BAGATINI, T. Comparação do uso de modelos digitais de elevação em mapeamento digital de solos em dois. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 1367-1376, 2014.

USGS. **Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. Reston: USGS, 2020. Disponível em: https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation--shuttle-radar-topography-mission-srtm-non?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects. Acesso em: 10 fev. 2020.

19

Espectrorradiometria em agricultura de precisão nas terras baixas do Rio Grande do Sul

Spectroradiometry in Precision Agriculture in the lowlands of Rio Grande do Sul

José Maria Filippini-Alba[1], Pablo Miguel[2], Mélory Maria Fernandes de Araujo[3]

[1] *Pesquisador, Embrapa Clima Temperado, Pelotas (RS), Brasil, jose.filippini@embrapa.br*

[2] *Professor/Pesquisador, Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Departamento de Solos, Capão do Leão (RS), Brasil, pablo.ufsm@gmail.com*

[3] *Engenheira Hídrica, Doutoranda em Manejo e Conservação do Solo e da Água, Universidade Federal de Pelotas, Capão do Leão (RS), Brasil, mmfa.eh@gmail.com*

RESUMO

A agricultura de precisão (AP) demorou a ser adotada no setor do arroz irrigado, que ocupa quase um milhão de hectares no território do estado de Rio Grande do Sul, envolvendo tecnologias específicas para o manejo da água. Os principais solos utilizados são os Planossolos Háplicos, caracterizados por um relevo plano ou levemente ondulado, o que dificulta a análise da variabilidade espacial por meio da análise do estudo topográfico. Assim, as aplicações da espectrorradiometria em solos de várzea foram discutidas a partir da pesquisa desenvolvida pela Rede de AP da Embrapa na Estação Experimental Terras Baixas (EETB) da Embrapa Clima Temperado, localizada em Capão do Leão, RS. Os resultados sugerem um potencial significativo da tecnologia, principalmente quando se considera a simulação dos atributos físicos e químicos do solo.

Palavras-chave: arroz; pedologia; sensoriamento proximal; sensoriamento remoto; solo.

ABSTRACT

Precision Agriculture (PA) took a long time to be adopted in the irrigated rice sector, which covers almost one million hectares in the Rio Grande do Sul (RS) state, involving specific technologies for water management. The main soils used are the Haplic Planosols, characterised by flat or slightly undulating terrain, which makes it difficult to analyse spatial variability using topographic analysis. Thus, the applications of spectroradiometry in floodplain soils were discussed based on the research carried out by the Embrapa PA Network at the Embrapa at the Lowlands Experimental Station of Embrapa Temperate Climate Center, in Capão do Leão, RS. The results suggest a significant potential for the technology, especially when considering the simulation of the soils' physical and chemical attributes.

Keywords: rice; pedology; proximal sensing; remote sensing; soil.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000073

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Silva et al. (2002), a economia da restinga da lagoa Mirim, no Rio Grande do Sul, está baseada na agricultura empresarial, sendo o cultivo do arroz irrigado, integrado à criação de gado de corte, a principal opção comercial. Porém, a intensificação do cultivo do arroz irrigado nos solos de várzea tem aumentado a pressão de invasoras sobre a cultura. Por essa razão, o arroz irrigado vem sendo cultivado por um ou, no máximo, dois anos consecutivos, sucedidos por, no mínimo, três anos com pecuária de corte extensiva. Esse sistema tem baixa rentabilidade econômica e apresenta degradação do solo; portanto, a rotação com outras culturas, como milho, soja, sorgo, trigo e pastagens cultivadas, é recomendada. Atualmente, a soja tem sido integrada ao contexto junto com o sistema de camaleões para drenagem das lavouras, sendo que sua ocupação na restinga da lagoa Mirim aumentou de 0,3% para 7,8% do território no período 2000 a 2019 (Winckler et al., 2021).

Em evento realizado na Embrapa Clima Temperado, Pelotas/RS em 2017, denominado "Uso de geotecnologias na produção de soja em terras baixas", foi mencionado que existem 184 mil ha cultivados com arroz e 55 mil ha em rotação com soja, dois anos por três anos, respectivamente, sendo que 29 propriedades apresentaram produção acima de 10 toneladas por ha na safra 2016/2017 na metade Sul-RS. Outras tecnologias relacionadas foram a fixação biológica de N, a sistematização localizada e o uso do sistema de sulco – camaleão, usando politubos para irrigação.

A espectrorradiometria de reflectância é uma técnica de sensoriamento proximal (in loco), que envolve medições em campo ou em laboratório, de espectros de energia eletromagnética refletida no intervalo de comprimentos de onda de 400 nm a 2.400 nm. Essa técnica é baseada nos mesmos princípios usados em sensoriamento remoto (Kardeván, 1997). A energia eletromagnética corresponde à luz visível no intervalo 400 nm a 700 nm, mudando para o infravermelho para comprimentos de onda maiores. Trata-se de uma técnica não destrutiva que pode ser aplicada para caracterizar águas, alimentos, metais, minerais, solos, rochas, vegetação, enfim, praticamente qualquer tipo de material industrial ou natural. No entanto existe a dependência com métodos convencionais de análises aos efeitos de calibrar a técnica. A aplicação poderá ser baseada na prospecção de alvos em imagens orbitais (Ducart et al., 2015), pela simulação de atributos com base em amostras de referência (Filippini-Alba et al., 2019) ou por meio do reconhecimento de padrões espectrais de minerais específicos para caracterização de solos (Dematte et al., 2019) ou domínios geológicos.

Filippini-Alba et al. (2007) sugeriram o uso de espectrorradiometria para caracterizar as classes de solos nas terras baixas do estado do Rio Grande do Sul, pois ocorrem mudanças drásticas em curto espaço, com mudanças de relevo suave e diferenças de altitude na escala de centímetros, cuja discriminação deriva em levantamento altimétrico detalhado. Assim, o objetivo desse capítulo é discutir o uso da AP para o manejo de arroz irrigado, mas enfatizando as técnicas que utilizam a espectrorradiometria, conforme as aplicações mencionadas no parágrafo anterior, dado o potencial que apresenta a técnica para o setor.

2 APLICAÇÃO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO NO CULTIVO DE ARROZ IRRIGADO

Acosta et al. (2010) utilizaram técnicas de agricultura de precisão (AP) para o manejo da adubação em lavouras de arroz irrigado na safra 2009/10 em São Gabriel/RS. Foram consideradas duas áreas de 70 ha cada uma, com coleta de uma amostra de solo por hectare. O manejo de AP se aplicou na área de menor fertilidade, com fertilização em taxa variável. Na área de AP obteve-se 3% a mais de produtividade e 18% a mais de rentabilidade em relação à área de referência com agricultura convencional, embora tenha havido um aumento da adubação de 38% em R$/ha.

Nöller (2012) mencionou que as técnicas de AP tiveram um avanço na sua utilização para o cultivo de arroz irrigado (*Oryza sativa L.*) no período 2007-2012, pelo surgimento de equipamentos adaptados à cultura. Há aproximadamente um milhão de hectares ocupados pela cultura no estado, sendo que no Brasil houve um aumento de produtividade de 1.500 $kg.ha^{-1}$ na safra 1976/1977 para 4.737 $kg.ha^{-1}$ em 2011/2012, principalmente em função do melhoramento genético, com 48% de diminuição da área cultivada (Companhia Nacional de Abastecimento, 2012). Nesse mesmo período, o Rio Grande do Sul aumentou sua área cultivada em 102%, incrementando a produtividade de 3.550 $kg.ha^{-1}$ para 7.650 $kg.ha^{-1}$. Esse aumento de produtividade seria relacionado ao sistema de inundação e manejo da água.

No estudo de Nöller (2012) se considerou uma área de 750 ha, conforme duas subáreas divididas em dois talhões cada uma, de maneira que o manejo da água numa subárea foi efetuado em taipas e na outra subárea se utilizou sistematização, com aplicação da fertilização por taxa variável, manejo do solo conforme grade de 0,5 ha para as áreas sistematizadas e de 1 ha na subárea das taipas, com 16 pontos por talhão.

As variáveis consideradas foram argila, CTC, matéria orgânica (MO), Ca, Mg. K, Al e pH em água. A malha de 1 ha foi suficiente para avaliar a variação espacial, com a exceção do caso da MO. As áreas sistematizadas mostraram maior produtividade, sendo que foram produzidos 7.091 kg.ha^{-1} em 2007/08 e 7.537 kg.ha^{-1} em 2008/2009 nos talhões das taipas, com aumento de 446 kg.ha^{-1}. Já no caso dos talhões sistematizados, as produtividades foram 7.448 kg.ha^{-1} e 8.612 kg.ha^{-1}, respectivamente, com diferença de 1.173 kg.ha^{-1}.

Cruz et al. (2014) realizaram amostragem em malha regular em área de integração arroz irrigado-pecuária na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão/RS (EETB). Foram definidos sete transectos, de sete amostras cada um, com distância entre amostras de 15 m e área total de 0,81 ha (90 m x 90 m). As variáveis MO e densidade do solo ajustaram-se ao semivariograma conforme modelo gaussiano, com alcance de 76 m e 67 m, respectivamente, porém a variabilidade espacial foi aprimorada pelo uso conjunto das duas variáveis (cokrigagem). Assim, uma malha de 0,4 ha seria indicada para aplicações em áreas maiores (distância de amostragem de 63 m aproximadamente). Os teores de K, N e P coletados na mesma malha regular foram processados em sistema de informação geográfica (SIG), considerando métodos de tomada de decisão conforme a lógica booleana e a lógica fuzzy. Ambos os métodos apresentaram resultados comparativos, com melhor aptidão na metade sul da área, porém sem boa sobreposição com os teores de matéria seca das plantas arroz (Filippini-Alba, 2014).

3 SOLOS DE TERRAS BAIXAS, ZONA SUL – RS

Em escala regional, Cunha et al. (2006) mencionaram que nas planícies sedimentares holocênicas, eventualmente inundáveis no inverno, que margeiam as lagoas dos Patos e Mirim, ocorrem solos hidromórficos diversificados com uso agrícola limitado, pelo risco ao pastoreio; predominando Gleissolos Melânicos Ta e eutróficos associados à Planossolos Háplicos e Neossolos Flúvicos. Já nas planícies sedimentares pleistocênicas, não inundáveis, também próximas às mencionadas lagoas, mas com acréscimo de 2 m em altitude, os Planossolos Háplicos, geralmente eutróficos, têm sido cultivados com arroz irrigado. Outros cultivos adaptaram-se às condições de má drenagem. Também ocorrem Argissolos Vermelho-Amarelos e na faixa mais costeira Neossolos Quatzarênicos.

Nos solos da EETB, predominam os Planossolos Háplicos eutróficos e os Gleissolos Melânicos com associação eventual de Espodossolos e Organossolos (Cunha; Costa, 2013). Filippini-Alba et al. (2007) apresentaram a descrição morfológica de um perfil de Planossolo Háplico eutrófico arênico localizado na EETB (Figura 1). Do ponto de vista químico existe aumento do conteúdo de elementos alcalinos e alcalino-terrosos e do pH em água com a profundidade, fato que se repete para o conteúdo de Al até o Horizonte Btgf, caindo significativamente o teor de Al em Btg. Os teores de C e N apresentam comportamento oposto, diminuindo com a profundidade e mantendo a relação C/N em 8-12. Areia grossa, areia fina e silte apresentaram decréscimo com a profundidade, e situação contrária verificou-se para argila.

Os Planossolos estão associados a plantios inundados como a orizicultura, pois possibilitam a inundação do solo através da impermeabilidade da sua camada subsuperficial (horizonte plânico). A mecanização desses solos demanda cuidados severos, pois a drenagem imperfeita pode ocasionar problemas como a compactação pelo tráfego de máquinas, principalmente.

Um dos solos mais utilizados com o cultivo de arroz irrigado no Estado do Rio Grande do Sul é o Planossolo Háplico da Unidade de Mapeamento (UM) Pelotas (Brasil, 1973; Streck et al., 2018). A UM Pelotas

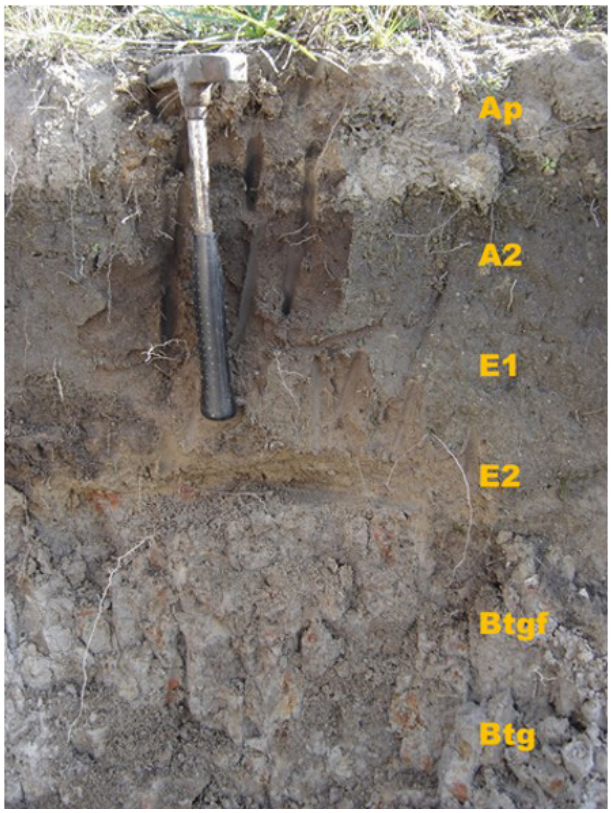


Figura 1. Foto do perfil de um Planossolo Háplico eutrófico arênico da EETB, Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão/RS.
Fonte: Carlos A. Flores.

(Figura 2) (que apresenta caráter solódico devido à saturação por sódio com valores entre 6% e 15% dentro de 120 cm da superfície do solo) é encontrada nas regiões do Litoral Sul e Planícies Costeiras Interna e Externa, sendo derivada de sedimentos lagunares e lacustres, ocupando os terraços mais elevados.

Esses solos apresentam, geralmente, sequência de horizontes A1, A2, E, Btg, BCg. Horizonte A, podendo apresentar sub-horizontes A1, A2 ou Ap, de coloração cinzento-escura ou bruno-acinzentada escura, textura franco-arenoso. A estrutura é maciça ou fracamente desenvolvida em blocos subangulares ou granular. A transição é abrupta e plana para o horizonte B. Horizonte B textural, com teores mais elevados de argila (mais que o dobro de argila que o horizonte A), com cores cinzentas (glei), com mosqueados de várias tonalidades, consequência da oscilação do lençol freático e de diferentes concentrações de ferro. Normalmente, a estrutura é prismática, fortemente desenvolvida.

Figura 2. Perfil de Planossolo Háplico eutrófico solódico (Unidade de Mapeamento Pelotas/RS, Brasil, 1973).
Fonte: Professor Pablo Miguel/UFPel.

4 RESPOSTA DA ESPECTRORRADIOMETRIA

4.1 Em função do relevo

Em pesquisa realizada na EETB, Capão do Leão/RS, foi avaliada a influência da altitude nas medidas espectrorradiométricas. O registro espectral foi realizado em condições de baixa nebulosidade e luminosidade adequada, por meio do espectrorradiômetro Li-Cor, não ativo, modelo LI-1800, na faixa de comprimentos de onda de 300 nm a 1.100 nm, utilizando como referência a placa Spectralon 50% (Labsphere, SRT-50-050). O equipamento e a placa foram cedidos gentilmente pela Embrapa Uva e Vinho (Bento Gonçalves/RS). Foram analisados quatro locais em condições de elevação diferenciadas, localizados próximos à área de experimentos da EETB, com separação interlocais de 60-600 m e altitude de 9 m, 12 m, 15 m e 14 m acima do nível do mar. Em todos os locais se registraram as coordenadas geográficas e a elevação aproximada através de receptor GPS, marca Leica, modelo SR20. A reflectância espectral (RR) relativa para os quatro locais avaliados, considerando a superfície sem cobertura vegetal, se apresenta na Figura 3.

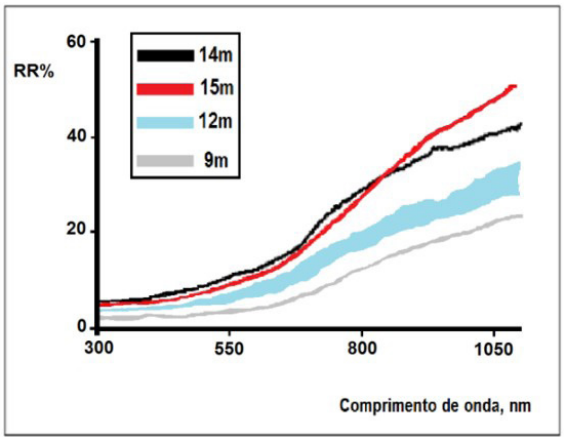


Figura 3. Reflectância relativa (RR%) do solo superficial em quatro locais com altitude diferenciada da Estação Experimental Terras Baixas, Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão/RS.
Fonte: Filippini-Alba et al. (2007).

O espectro correspondente aos 12 m foi duplicado, e assim a faixa azul clara expressa à magnitude do erro da medição; o que explicaria a confusão entre as curvas de 14 m e 15 m. No geral, os menores valores da refletância associam-se com baixas altitudes, o que, no intervalo visível do espectro eletromagnético, equivale ao escurecimento da cor do solo, principalmente nas depressões. Para explicar esse fenômeno, deve-se considerar a gênese desses solos de restinga, com aplainamento original em função da regressão marinha. Depois da retirada do mar, a superfície manteve um aspecto suave-ondulado, quase plano, conforme um modelo côncavo-convexo. De maneira que, com

a movimentação da água de chuva, partículas minerais finas e fragmentos biológicos depositam-se nas depressões, formando paulatinamente uma fina camada de solo, que desenvolve espessura no decorrer do tempo, tornando-se hospedeira de vida animal e vegetal, provocando assim o comentado escurecimento da camada original (Figura 4).

4.2 Em função da mineralogia do solo

A fração 2 mm das amostras coletadas a 10-20 cm de profundidade, na área descrita na seção "Aplicação de AP em arroz irrigado" (Cruz et al., 2014; Filippini-Alba, 2014), foram analisadas no espectrorradiômetro portátil FieldSpec 3, sendo medida a refletância no intervalo 350 nm a 2.500 nm, na Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos/SP, sendo o trabalho direcionado para a determinação da composição mineralógica/vegetal do solo (Lima, 2021). Em síntese, foram diferenciados dois grupos de amostras, com as seguintes composições médias: a) 32% de caulinita de baixa cristalinidade, 33% de muscovita e 35% de matéria seca; b) 57% de caulinita de baixa cristalinidade e 43% de matéria seca. A distribuição espacial desses grupos mostrou dependência espacial significativa, e para as amostras do grupo b, baixa correlação espacial com os valores de matéria seca de arroz comentada anteriormente (Figura 5). O levantamento original foi realizado em 2012, por isso há um contraste significativo com a imagem de fundo (Google) que apresenta a área em épocas recentes.

4.3 Simulação de atributos do solo

Atributos físicos e químicos do solo têm sido estimados por meio de sensoriamento remoto e espectrorradiometria desde 1986 (Ge et al., 2011), quando revisaram-se 36 estudos envolvendo 15 parâmetros, como conteúdos granulométricos, pH, teores de elementos químicos etc. Segundo os autores, o método mais utilizado foi espectrorradiometria no intervalo visível-infravermelho com medidas em laboratório e processamento por diferentes métodos estatísticos multivariados. Também mencionaram que "nas últimas décadas, a produção agrícola evoluiu de uma era das máquinas, para a era da informação e posteriormente para a AP", o que implica em aperfeiçoar o uso de insumos em escala detalhada de maneira a estabelecer ganhos de lucratividade e benefícios ambientais. As geotecnologias são extensivamente utilizadas em AP, derivando na sua implantação em todos os aspectos da produção agrícola. Como tecnologia intensiva em computação e informação, seu sucesso dependerá, significativamente, da eficiência e confiabilidade dos métodos específicos de coleta e processamento em campo. Assim, uma interação entre a AP, a espectrorradiometria e o manejo de solos se apresenta como linha de pesquisa para futuros desenvolvimentos, sendo que, aparentemente, o grande obstáculo nesse sentido é a inconsistência dos modelos obtidos por diversos estudos em diferentes localidades.

Na área mencionada anteriormente (Figura 5) foram consideradas as amostras coletadas a 0-10 cm de profundidade (fração inferior a 2 mm), analisadas para teores de Al, Ca, K, Mg, P e MO, conteúdo de areia, argila e silte no Laboratório de Nutrição Vegetal da Embrapa Clima Temperado, Pelotas/RS (Filippini-Alba et al., 2019). As medições por espectrorradiometria realizaram-se em cooperação com o Centro Estadual de Sensoriamento Remoto e Meteorologia

Figura 4. Local de amostragem com altitude de 14 m, EETB, Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão/RS. Há pequeno ganho de altitude nas proximidades da zona arenosa (cor clara) em relação às áreas encharcadas no fundo. À direita, as características do solo sem cobertura vegetal no local de medição.
Fonte: Marilice C. Garrastazu.

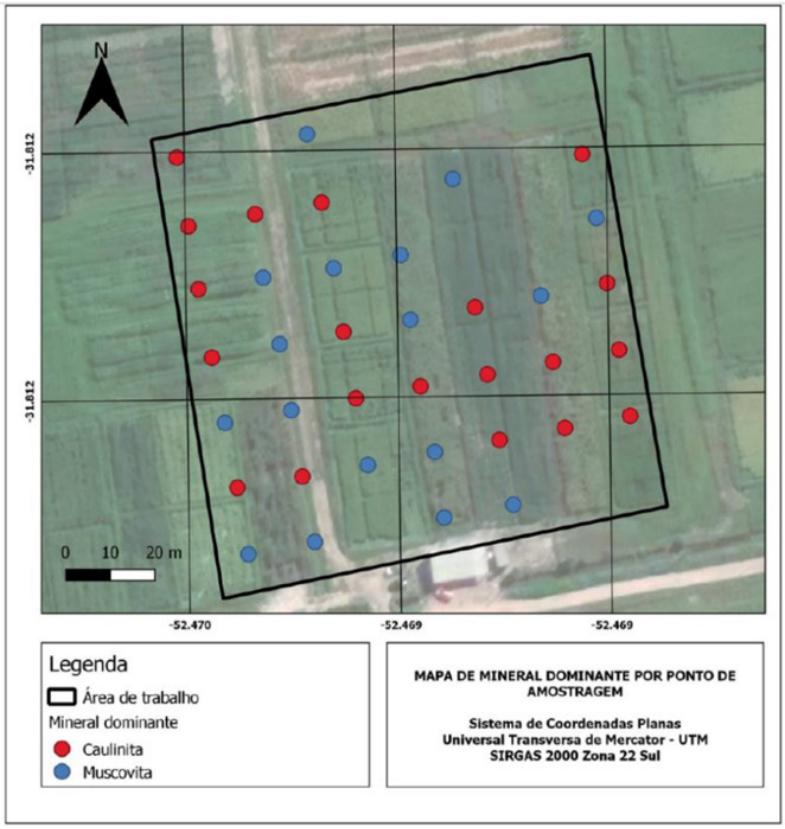


Figura 5. Distribuição espacial das amostras classificadas pela composição mineralógica/vegetal do solo (fração inferior a 2 mm) por meio de espectrorradiometria na EETB, Capão do Leão/RS.
Fonte: Lima (2021), Google®.

da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 2013 com equipamento FieldSpec 3, em intervalo de comprimentos de onda de 350 nm a 2.500 nm e resolução espectral de 1 nm. As bandas de refletância foram processadas por análise em componentes principais (Jöreskog et al., 1976), método multivariado que gera combinações lineares das variáveis originais, as bandas de reflectância no caso, denominadas de principais componentes (PCs). As PCs foram utilizadas para estimar as variáveis físico-químicas por meio de modelos de regressão, alcançando eficiência 100% ($R^2 = 1$) quando o número de PCs alcançou o número de amostras.

5 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO NO RIO GRANDE DO SUL

A espectrorradiometria em solos vem sendo desenvolvida para quantificar as propriedades espectralmente ativas de amostras de solo, podendo ocorrer a combinação de métodos de modelagem multivariada, desta forma é necessário utilizar um conjunto de técnicas de interpretação espectral, a fim de extrair todas as informações que o espectro pode fornecer. No mundo todo, vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos para estudar e caracterizar a concentração de elementos em solos através do seu comportamento espectral. Segundo Demattê e Terra (2014), a utilização dessa técnica pode ser muito útil na avaliação de variações pontuais do solo em profundidade devido à interação da luz com propriedades do solo refletindo dados intrínsecos relacionados com eles. Vários atributos do solo também podem ser quantificados através desse método, como matéria orgânica, caracterização granulométrica de amostras de solos com diferentes classes de texturas, devido ao fato dos espectros de solo fornecem informações diversas, uma vez que esses possuem uma composição heterogênea (Tabela 1).

Segundo Ten Caten et al. (2021), a granulometria do solo, a condutividade elétrica e a umidade do solo têm apresentado boas correlações na região do VIS-NIR-SWIR-MIR. Na modelagem de carbono orgânico do solo (COS), Soriano-Disla et al. (2014) observaram boas predições na região do VIS-NIR-SWIR-MIR, embora o carbono orgânico tenha apresentado melhor resultado na região do MIR.

A maioria dos estudos tem buscado a utilização da espectrorradiometria com diferentes pré-processamentos estatísticos de dados com o objetivo de melhorar a confiabilidade dos modelos. No geral, atribu-

Tabela 1. Seleção de trabalhos com uso da espectrorradiometria no Rio Grande do Sul.

Referências	Região	Amostragem	Característica	Faixa espectral (nm)	NA
Naibo (2021)	Nordeste	SS	Química	1000-2500	512
Tiecher et al. (2021)	Nordeste	SS	Química	200-2500	69
Moura-Bueno et al. (2020)	Norte/Central	Solo	MO	350-2500	2471
Thum et al. (2020)	Norte	Solo/Vegetação	Química	350-2500	Sem informação
Carvalho (2019)	Norte	Solo	MO e argila	1200-2400	2388
Moura-Bueno et al. (2019)	Norte	Solo	MO	350-1100	841
Tiecher et al. (2016)	Nordeste	Sedimentos	Química	1000-2500	Sem informação
Tiecher (2015)	Nordeste	Sedimentos	Química	200-800	Sem informação
Schneider (2012)	Nordeste	Sedimentos	Química	400-2500	11
Dotto (2012)	Central	Solo	Textura e MO	400-2500	178
Dotto (2012)	Central	Solo	MO	350-1000	178
Hoff et al. (2009)	Sudeste	Solo/Rocha	Argila	1300-2500	Sem informação
Filippini-Alba et al. (2007)	Sul	Solo	Altitude	300-1100	8
Silva (2006)	Nordeste/Sul	Vegetação	Reflectância	300-1100	40

MO: matéria orgânica; SS: solos e sedimentos; NA: número de amostras.

tos como carbono orgânico do solo e granulometria (argila, principalmente) têm apresentado bons resultados (R^2) na modelagem. Uma das variáveis que influenciam muito nesse processo é o tamanho do conjunto amostral. Quanto maior for a variabilidade dos dados, maiores são as chances de sucesso dos modelos. Por outro lado, ainda são incipientes e, por consequência, pouco confiáveis, estudos que buscam modelar elementos químicos, como P, Na, K, composição mineralógica, vegetação e argilominerais.

Em termos de desenvolvimento das atividades agrícolas é de grande valia que se conheçam as características do solo através de métodos com alto rendimento analítico, menor uso de reagentes químicos, que demandam menor tempo nas análises, diminuindo o impacto ambiental. Muitas vezes a falta do conhecimento do histórico de uso da terra dificulta a formulação de políticas de conservação e recuperação de áreas degradadas.

6 CONCLUSÕES

A adoção das técnicas de AP na cultura de arroz irrigado foi demorada devido à falta de tecnologias apropriadas. Primeiramente, a produtividade aumentou como consequência das técnicas de melhoramento genético; posteriormente pelo manejo da água. É uma cultura agrícola tecnologicamente avançada devido à exigência de sistematização de áreas e à adoção de formas de manejo como o sistema sulco-camaleão. O benefício proporcionado pela AP decorre do manejo da variabilidade espacial. Foram mencionados ganhos de produtividade e rentabilidade; no entanto, devido ao tratamento diferenciado nas áreas de referência, isso gerou certa desconfiança nos resultados.

Os Planossolos Háplicos emergem como solos adequados ao cultivo do arroz local, com variabilidade espacial controlada pelo material de origem, em vez da declividade, como na maioria dos solos. Recomenda-se a coleta de 25 amostras a cada 10 ha, que equivale a uma distância de amostragem de 63 m, resultando em um total mínimo de 100 amostras para uma avaliação adequada da variabilidade espacial em área de 40 ha. O horizonte A2 parece a princípio o mais adequado para amostragem devido a sua profundidade e estabilidade em comparação aos outros horizontes.

Na fase de pré-cultivo, o monitoramento dos atributos do solo por meio da espectrorradiometria emerge como opção altamente promissora. A dependência com a calibração poderá ser diluída significativamente para anos posteriores, com a redução do número de amostras. A dependência com o relevo se insere no contexto, dada sua relação com a ocorrência de MO. A integração desses equipamentos em veículos motorizados pode otimizar sua utilização, especialmente durante a fase de entrada da água, o que ampliaria as possibilidades de uso de veículos aéreos. A

aplicação envolvendo a análise mineralógica deverá ser estudada com maior detalhamento.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Estadual de Sensoriamento Remoto e Meteorologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/RS), à Embrapa Instrumentação Agropecuária (São Carlos/SP) e à Embrapa Uva e Vinho (Bento Gonçalves/RS) pelo suporte nas medições espectrorradiométricas.

REFERÊNCIAS

ACOSTA, J. A. A.; BUSATO, M. R.; LONDERO, G. T.; LEMAINSKI, C. L.; SANTI, O. G. R. Uso de técnicas de precisão no manejo da adubação do arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2010, Ribeirão Preto. **Resumos Ampliados**. Riberão Preto: ConBAP, 2010. 6 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Brasília, DF: Mapa, 1973. 431 p. (Boletim Técnico, 30).

CARVALHO, J. K. **Avaliação de métodos de pré-processamento e modelagem matemática aplicados à espectroscopia de infravermelho próximo para estimar teores de argila e matéria orgânica do solo**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série histórica de arroz brasileiro online**, 2012. Disponível em: http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2. 02 jun. 2012.

CRUZ, L. E.; FILIPPINI-ALBA, J. M.; PARFITT, J. M. B.; PILLON, C. N. Estudo da variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo em um agroecossistema de arroz irrigado para suporte à agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de Precisão:** resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 211-218.

CUNHA, N. G.; COSTA, F. A. **Solos da Estação Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado**. Pelotas: Embrapa, 2013. 6 p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S. **Solos e terras do Planalto Sul-Rio-Grandense e planícies costeiras**. Pelotas: Embrapa, 2006. 44 p.

DEMATTÊ, J. A. M.; TERRA, F. S. Spectral pedology: a new perspective on evaluation of soils along pedogenetic alterations. **Geoderma**, v. 217-218, p. 190-200, 2014.

DEMATTE, J. A. M.; DOTTO, A. C.; PAIVA, A. F. S.; SATO, M. V.; DALMOLIN, R. S. D.; ARAÚJO, M. D. S. B. de; SILVA, E. B. da; NANNI, M. R.; TENCATEN, A.; NORONHA, N. C.; LACERDA, M. P. C.; ARAÚJO FILHO, J. de; RIZZO, R.; BELLINASO, H.; FRANCELINO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VICENTE, L. E.; SANTOS, U. J. dos; SAMPAIO, E. V. S. B.; MENEZES, R. S. C.; SOUZA, J. J. L. L. de; ABRAHÃO, W. A. P.; COELHO, R. M.; GREGO, C. R.; LANI, J. L.; FERNANDES, A. R.; GONÇALVES, D. A. M.; SILVA, S. H. G.; MENEZES, M. D. de; COUTO, E. G. C.; ANJOS, L. H. C. dos; CEDDIA, M. B.; PINHEIRO, E. F. M.; GRUNWALD, S.; VASQUES, G.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; SILVA, A.J. da; BARRETO, M.C.D.V.; NÓBREGA, G. N.; SILVA, M. Z. da; SOUZA, S. F. de; VALLADARES, G. S.; VIANA, J. H. M.; TERRA, F. S.; HORÁK-TERRA, I.; FIORIO, P. R.; SILVA, R. C. da; FRADE JÚNIOR, E. F.; LIMA, R. H. C.; FILIPPINI-ALBA, J. M.; SOUZA JUNIOR, V. S. de; BREFIN, M. D. L. M. S.; RUIVO M. D. L. P.; FERREIRA T. O.; BRAIT M. A.; CAETANO N. R.; BRINGHENTI, I.; MENDES, W. de S.; SAFANELLI, J. L.; GUIMARÃES, C. C. B.; POPPIEL, R. R.; SOUZA, A. B. E.; QUESADA, C. A.; COUTO, H. T. Z. The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): a general view, application and challenges. **Geoderma**, v. 354, p. 1-21, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.043.

DOTTO, A. C. **Funções de pedotransferência do solo estimativa por radiometria**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

DUCART, D. F.; SILVA, A. M.; TOLEDO, C. L. B.; ASSIS, L. M.; PRADO, E. M. G. Caracterização espectral quantitativa do minério de ferro na Mina N4, Província Mineral de Carajás, a partir de imagens Landsat 8 e Hyperion. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: INPE, 2015. p. 518-525.

FILIPPINI-ALBA, J. M. Modelagem SIG em agricultura de precisão: conceitos, revisão e aplicações. In: BERNARDI, A. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de Precisão:** resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 84-96.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; FLORES, C. A.; GARRASTAZÚ, M.C.; SANDRINI, W. C. **O uso da espectrorradiometria no mapeamento de solos:** estudo de caso na Estação Experimental Terras Baixas. Pelotas: Embrapa, 2007. 28 p.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; CRUZ, L. E. C. da; DUCATI, J. R.; CUNHA, H. N. da; DOMINGUES, J. M. M. Processing spectroradiometry data for simulation of soil physicochemical parameters. **International Journal of Developmental Research**, v. 9, n. 8, p. 28875-28880, 2019.

GE, Y.; THOMASSON, A.; SUI, R. Remote sensing of soil properties in precision agriculture: a review. **Frontiers of Earth Science**, v. 5, n. 3, p. 229-238, 2011. DOI: http://doi.org/10.1007/s11707-011-0175-0.

HOFF, R.; BERGMANN, M.; DUCATI, J. R.; BOMBASSARO, M. G.; COSTA, G. L. Radiometria espectral de unidades geológicas integrada com imagem ASTER para definição de terroir vitícola na Região de Encruzilhada do Sul, RS, Brasil. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE

VITICULTURA Y ENOLOGIA, 12., 2009, Montevideo. **Anais [...]**. Montevideo: Asociación de Enólogos del Uruguay, 2009.

JÖRESKOG, K. G.; KLOVAN, J. E.; REYMENT, R. A. **Geological Factor Analysis**. Amsterdã: Elsevier, 1976. 178 p.

KARDEVÁN, P. Reflectance spectroradiometer – a new tool for environmental mapping. **Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences**, v. 2, p. 29-38, 1997.

LIMA, A. **Reconhecimento da composição mineralógica de um Planossolo Háplico por meio de espectrorradiometria**. Trabalho de Conslusão (Graduação em Engenharia Geológica) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021. 34 p.

MOURA-BUENO, J. M.; DALMOLIN, R. S. D.; TEM CATTEN, A.; DOTTO, A. C.; DEMATTÊ, J. A. M. Stratification of a local VIS-NIR-SWIR spectral library by homogeneity criteria yields more accurate soil organic carbon predictions. **Geoderma**, v. 337, p. 565-581, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.015.

MOURA-BUENO, J. M.; DALMOLIN, R. S. D.; HORST-HEINEN, T. Z.; TEM CATEN, A.; VASQUES, G. M.; DOTTO, A. C.; GRUNWALD, S. When does stratification of a subtropical soil spectral library improve predictions of soil organic carbon content? **Science of the Total Environment**, v. 737, 139895, p. 1-21, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139895.

NAIBO, G. **Espectroscopia de infravermelho próximo para estimar a concentração de elementos em solos e sedimentos em uma bacia hidrográfica rural**. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Porto Alegre, 2021.

NÖLLER, D. S. **Agricultura de precisão na cultura do arroz irrigado (Oryza sativa) em áreas sistematizadas e não sistematizadas**. Dissertação (Mestrado em Engenhara Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012, 97 p.

SCHNEIDER, I. L. **Caracterização espectroscópica dos sedimentos da bacia hidrográfica do Rio dos Sinos (RS)**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SILVA, J. J. C.; MELO, R.; ALMEIDA, J. R.; CORRÊA, R.; RAUPP, A. A. A.; COELHO, R.; RODRIGUES, R. C.; BASANESI, J. C. **Camaleões:** uma opção para o problema de drenagem das Terras Baixas na região costeira da Lagoa Mirim. Pelotas: Embrapa, 2002. 36 p.

SILVA, P. R. **Técnicas de Sensoriamento Remoto e Radiometria Aplicadas a Vinhedos em duas regiões do Rio Grande do Sul, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SORIANO-DISLA, J. M.; JANIK, L. J.; VISCARRA-ROSSEL, R. A.; MACDONALD, L. M.; MCLAUGHLIN, M. J. The performance of visible, near-, and mid-infrared reflectance spectroscopy for prediction of soil physical chemical, and biological properties. **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 49, n. 2, p. 139-186, 2014. DOI: http://doi.org/10.1080/05704928.2013.811081.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre. 3. ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2018. 222 p.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; SILVA, E. B.; HEINEN, T. Z. H.; SAFANELLI, J. L. Avanços na observação e no conhecimento do solo via o sensoriamento próximo. **Agropecuária Catarinense**, v. 34, n. 1, p. 72-78, 2021. DOI: http://doi.org/10.52945/rac.v34i1.1048.

TIECHER, T. **Fingerprinting sediment sources in agricultural catchments in Southern Brazil**. 2015. 307 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

TIECHER, T.; CANER, L.; MINELLA, J. P. G.; BENDER, M. A.; SANTOS, D. R. Tracing sediment sources in a subtropical rural catchment of southern Brazil by using geochemical tracers and near-infrared spectroscopy. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 478-491, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2015.03.001.

TIECHER, T.; MOURA-BUENO, J. M.; CANER, L.; MINELLA, J. P. G.; EVRARD, O.; RAMON, R.; NAIBO, G.; BARROS, C. A. P.; SILVA, Y. J. A. B.; AMORIM, F. F.; RHEINHEIMER, D. S. Improving the quantification of sediment source contributions using different mathematical models and spectral preprocessing techniques for individual or combined spectra of ultraviolet–visible, near- and middle-infrared spectroscopy. **Geoderma**, v. 384, p. 114815, 2021.

THUM, A. B; ARRUDA, D. C.; DUCATI, J. R.; PITHAN, P. A; ROLIM, S. B.A. The influence of mineral content on spectral features of vine leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 23, p. 9161-9179, 2020. DOI: http://doi.org/10.1080/01431161.2020.1798547.

WINCKLER, L. T.; WOLFF, C. B.; COSTA, F. A. **Serviços ambientais de sistemas de produção integrados com soja em terras baixas**. Pelotas: Embrapa, 2021, 18 p.

ORBIO: Uma aplicação web para controle biológico com veículos aéreos não tripulados

20

ORBIO: A Web Application for Biological Control with Unmanned Aerial Vehicles

Bruno Siqueira da Silva[1], Tauã Milech Cabreira[2], Bruno José Olivieri de Souza[3], Nicholas Matias[4], Ricardo Antônio de Oliveira Machado[5], Lucio André de Castro Jorge[6], Paulo Roberto Ferreira Junior[7]

[1] *Professor, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha (IFFar), São Borja (RS), Brasil, bruno.siqueira@iffarroupilha.edu.br*

[2] *Professor, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-Grandense (IFSul), Pelotas (RS), Brasil, tauacabreira@ifsul.edu.br*

[3] *Professor, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ), Rio de Janeiro (RJ), Brasil, bolivieri@inf.puc-rio.br*

[4] *Pesquisadores, BirdView Drone Bio Control, São Manoel (SP), Brasil, nicholas@birdview.com.br*

[5] *Pesquisadores, BirdView Drone Bio Control, São Manoel (SP), Brasil, ricardo@birdview.com.br*

[6] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, lucio.jorge@embrapa.br*

[7] *Professor, Programa de Pós-Graduação em Computação (PPGC), Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas (RS), Brasil, paulo.ferreira@inf.ufpel.edu.br*

RESUMO

Pragas e doenças agrícolas podem causar prejuízos financeiros na escala de milhões por ano e ameaçar a segurança alimentar. O controle biológico (CB) é um processo para mitigar uma determinada população de pragas, tornando-as menos abundantes e prejudiciais, utilizando inimigos naturais. O uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs) como plataforma de apoio ao CB é promissor devido ao baixo custo operacional, alta eficiência e ampla faixa de aplicação. O planejamento da rota de cobertura do VANT é necessário para uma dispersão eficaz em uma área agrícola. No entanto, em muitos casos, esse planejamento é realizado empiricamente por pilotos em campo. Diversas necessidades devem ser consideradas na busca pela automatização e pela otimização do planejamento de rotas de cobertura para CB utilizando VANTs, tais como: identificação das principais características da área de cobertura, busca pelos pontos de pouso e decolagem adequados, determinação da distância entres as linhas paralelas da trajetória considerando o tipo de aplicação do agente biológico em uso, definição da altitude de voo, retorno com segurança à base considerando as limitações de energia do veículo e geração de arquivos contendo pontos de rota prontos para voar. Este capítulo apresenta uma aplicação web contendo um algoritmo de planejamento de caminhos de cobertura para automatizar rotas de controle biológico considerando aspectos essenciais de um cenário do mundo real. Voos reais planejados a partir do uso do aplicativo mostram a eficiência e confiabilidade da abordagem proposta.

Palavras-chave: agricultura de precisão; controle biológico; planejamento de rotas de cobertura; veículos aéreos não tripulados; manejo integrado de pragas.

ABSTRACT

Agricultural pests and diseases can threaten food security and cause multi-million dollar losses annually. Biological control (BC) is a process employing natural enemies to mitigate particular pest populations, thereby reducing their abundance and harmful effects. The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) as a platform to support BC shows promise due to low operating costs, high efficiency, and wide application range. UAV coverage path planning is necessary for effective dispersion over an agricultural area. However, planning is frequently carried out in situ by pilots in the field. Several issues need to be considered when seeking to automate and optimize coverage route planning for BC using UAVs. These include: identifying the main characteristics of the coverage area, looking for suitable landing and take-off points, determining the distance between the parallel line of the coverage trajectory given the biological agent in use, setting the flight altitude, safely returning to the base considering

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000081

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

vehicle energy limitations, and generating ready-to-fly route coverage files. This chapter presents the implementation of a web application applying a coverage path planning algorithm for automating biological control routes considering essential aspects of a real-world scenario. Actual flights using the application demonstrate the efficiency and reliability of the proposed approach.

Keywords: precision agriculture; biological control; coverage path planning; unmanned aerial vehicles; integrated pest management.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização de Agricultura e de Alimentos das Nações Unidas (ONU) (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019), estima-se que sejam perdidos, a cada ano, entre 20% e 40% da produção agrícola mundial devido a pragas e doenças que afetam as lavouras, valor que corresponde a aproximadamente 220 bilhões de dólares. Somente este ano, no Brasil, o prejuízo entre os produtores de grãos pode chegar a mais de R$ 41 bilhões. Além das dificuldades climáticas, que puxaram essa quebra de safra, o produtor também enfrenta problemas com as pragas. No Mato Grosso do Sul, o Sistema de Informação do Agronegócio – Siga MS, aponta um prejuízo estimado em aproximadamente R$ 5,8 bilhões. Recentemente, a Cogo Inteligência em Agronegócio apresentou um levantamento apontando que os prejuízos de quebra tanto da soja como do milho podem chegar a R$ 41,6 bilhões (Play no Agro, 2024).

O controle biológico (CB) através de métodos que utilizam inimigos naturais[1] surge como uma importante alternativa para o controle de pragas nas lavouras, visando não apenas a redução das perdas financeiras provocadas pelos agentes nocivos, mas também a substituição de agrotóxicos e de produtos químicos prejudiciais a nossa saúde. Segundo Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2021), o CB é um método de controle racional e saudável, que não deixa resíduos nos alimentos e é inofensivo ao meio ambiente e à saúde da população.

Uma cultura pode ser infectada em sua totalidade, dependendo do tipo de praga. Dessa forma, reduções no inóculo requerem dedicação contínua e recursos de mão de obra. O custo do manejo pode incluir inspeções realizadas por especialistas e aplicação de inseticidas para controle, o que pode acarretar um aumento dos custos de produção (Fontes; Valadares-Inglis, 2020). O grande desafio do CB é encontrar uma forma eficiente e economicamente sustentável de dispersão dos agentes biológicos nas áreas agrícolas. Uma alternativa interessante seria a proposição de um planejamento de missões inteligente, utilizando veículos aéreos não tripulados (VANT) para transportar e disseminar esses agentes. Para Freitas et al. (2020), o uso desse tipo de plataforma aérea é promissor para o controle biológico, pois pode-se reduzir custos e superar barreiras naturais, como rios ou contato com animais silvestres perigosos, com alta eficiência e uma faixa de aplicação ampla.

Nesse tipo de missão, o VANT deve sobrevoar uma determinada área transportando os agentes biológicos enquanto realiza a dispersão desses agentes em todos os pontos. Na literatura, esse tipo de problema é classificado como um subtópico da Robótica, conhecido como planejamento de rotas de cobertura (PRC). O planejamento da trajetória também engloba a definição das posições de decolagem e de pouso mais adequadas, levando em consideração a necessidade de um operador humano na execução de missões não autônomas e na supervisão de missões autônomas. Além disso, é preciso ter flexibilidade e agilidade no planejamento da trajetória, permitindo ao operador a modificação da rota previamente elaborada, considerando condições adversas inicialmente não observadas, tais como bloqueios de certas localidades, erosão ou inundação de estradas não frequentadas de grandes fazendas.

Outro fator crucial no planejamento de rotas é a quantidade de energia disponível nas baterias dos veículos aéreos. Os veículos devem retornar à base antes que sua fonte de energia se esgote completamente, para evitar colisões e acidentes. Usualmente, adota-se uma relação 70/30 de uso da bateria durante uma missão, em que o voo é executado utilizando apenas 70% da energia disponível na bateria, reservando-se os outros 30% restantes para um retorno seguro à base. Isso implica num planejamento que considere rotas mais curtas e simples, que possam ser executadas em apenas um voo com duração de tempo limitada – geralmente em torno de 15 minutos – dependendo do modelo de VANT adotado. Em áreas mais extensas, faz-se necessário a decomposição da área em subáreas e/ou da rota completa em sub-rotas, para a execução da missão através de múltiplos voos. Já os múltiplos voos podem ser executados por um único VANT, retornando à base para a troca de bateria entre um voo e outro, ou por múltiplos veículos

[1] Os inimigos naturais também podem ser chamados de parasitoides, predadores ou patógenos.

simultaneamente, exigindo o processamento de tarefas adicionais de coordenação da frota. Todas essas questões são restrições significativas a serem consideradas no problema de planejamento de rotas de cobertura em um cenário real.

Este capítulo apresenta a aplicação web ORBIO[2] para o planejamento de missões de cobertura aérea para controle biológico utilizando VANT. A aplicação é responsável pela organização e pelo gerenciamento de diversas missões. A verificação da proposta da aplicação é realizada através da implementação de um sistema que é capaz de gerar trajetórias automatizadas e seguras de cobertura completa, considerando todos os importantes fatores expostos sobre um cenário de aplicação real. A aplicação inclui: (i) uma interface intuitiva e amigável para a definição da área de cobertura utilizando um mapa; (ii) um sistema de configuração cujos parâmetros – velocidade, altitude, distância entre linhas, tempo máximo de voo – podem ser definidos de acordo com o tipo de missão e/ou tipo de VANT utilizado; (iii) um algoritmo de planejamento de rotas de cobertura baseado em movimentos de vai e volta e com trecho de retorno à base inteligente, com posições de decolagem e de pouso definidas pelo usuário; e (iv) uma ferramenta para a gerar arquivos de rota completos para o voo[3].

Este capítulo está dividido nas seguintes seções: seção 2 apresenta uma contextualização sobre o cenário do agronegócio no Brasil; seção 3 discorre sobre os trabalhos presentes na literatura que exploram soluções inteligentes para o controle biológico com o uso de VANT; seção 4 apresenta a aplicação web ORBIO para gerenciamento e planejamento de rotas de cobertura para controle biológico; seção 5 apresenta a implementação da aplicação web baseada em Java Script, que visa a otimização do transporte e da dispersão de agentes biológicos em culturas; seção 6 explica em detalhes a concepção do algoritmo de vai e volta para o problema de cobertura; seção 7 discorre sobre os experimentos realizados com voos reais para a validação da abordagem proposta; e, por fim, seção 8 aborda as conclusões e os trabalhos futuros.

[2] ORBIO é a sigla para Otimizador de Rotas para Controle Biológico.

[3] Esses arquivos possuem um formato reconhecido pela maioria das controladoras de voo do mercado, contendo informações de altitude, velocidade, latitude, longitude, bem como comandos específicos de voo, tais como decolagem, mudança de velocidade, deslocamento até o(s) ponto(s) da rota, retorno à base e pouso.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE O CENÁRIO DO AGRONEGÓCIO

O Brasil é líder mundial no setor do agronegócio, mas esse título foi alcançado graças ao uso intensivo de agrotóxicos sintéticos que também levou o país a se tornar o líder mundial no consumo desses produtos. De acordo com a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), o Brasil é responsável por um quinto do consumo mundial de agrotóxicos, usando 19% dos agrotóxicos produzidos no mundo. Anualmente são usados no mundo aproximadamente 2,5 milhões de toneladas de agrotóxicos. No Brasil, o consumo anual tem sido superior a 300 mil toneladas. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a utilização de produtos químicos para o controle de pragas, doenças e ervas daninhas mais que dobrou em dez anos. Entre 2002 e 2012, a comercialização de agrotóxicos no país passou de quase três quilos por hectare para sete quilos por hectare. Além do aumento do uso de agrotóxicos sobre os alimentos, o IBGE também avaliou os diferentes tipos de agrotóxicos sintéticos pulverizados sobre as lavouras. Cerca de 30% dos agrotóxicos foram classificados como muito perigosos (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2021).

Apesar desses dados alarmantes, o Brasil também começou a se destacar positivamente na liderança mundial de tecnologias relacionadas ao controle biológico, com aplicação em mais de 23 milhões de hectares. Enquanto o mercado de biológicos do mundo está crescendo 9% ao ano, em nosso país o aumento é de mais de 15% (Campo e Negócio, 2019). Somente no ano de 2020, mais de US$ 5 bilhões foram movimentados nesse setor, sendo US$ 800 milhões apenas na América Latina. Mas, apesar do grande crescimento na comercialização de insumos biológicos, os biodefensivos representam apenas 2% do mercado. Ou seja, 98% das vendas ainda são de defensivos químicos (Portal do Agronegócio, 2019). O aumento do uso do controle biológico se deve ao fato de as pessoas estarem buscando alimentos mais saudáveis, que sejam produzidos de forma sustentável e sem contaminar o ambiente. Outro fator que também justifica esse crescimento é a resistência que as pragas desenvolvem aos produtos químicos disponíveis, que deixam de ser efetivos.

Embora se trate de uma alternativa sustentável e com um mercado promissor, o controle biológico ainda esbarra na necessidade de meios mais inteligentes e eficazes de transporte e de dispersão desses agentes em áreas agrícolas. O processo é muitas vezes realizado de forma manual, por trabalhadores que percorrem longas distâncias para espalhar os agentes bio-

lógicos. Algumas iniciativas de automatização desse processo têm sido exploradas com o uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs), cuja estrutura pode ser adaptada com um dispositivo acoplado responsável por armazenar e dispersar os agentes biológicos em intervalos regulares de tempo (Zhan et al., 2021). Usualmente, esses veículos são guiados por operadores humanos através de controle remoto ou possuem armazenado em sua memória um plano de voo previamente elaborado de forma manual, através de um software, na estação de controle terrestre – o software de planejamento de voo mais popular é o Mission Planner (Oborne, 2010), cuja interface é compatível apenas com o sistema operacional Windows. Algumas iniciativas que utilizam VANT para o controle biológico explorando o problema de planejamento de rotas de cobertura são detalhadas na seção a seguir, seguida pela solução completa proposta neste capítulo.

3 AVANÇOS TECNOLÓGICOS NO CONTROLE BIOLÓGICO

Soluções de planejamento de cobertura para veículos aéreos não tripulados (VANTs) com preocupação energética foram propostas recentemente por Di Franco e Buttazzo (2016) e Cabreira et al. (2018). No trabalho de Di Franco e Buttazzo (2016) é proposto um algoritmo de cobertura baseado no movimento de vai e volta para aplicações de fotogrametria, que consiste em tirar uma sequência de fotos aéreas para montagem de um mosaico que pode ser utilizado na área de agricultura de precisão para identificação de pragas e doenças. Também voltado para a aplicação de fotogrametria, o trabalho de Cabreira et al. (2018) explora o movimento em espiral para realizar coberturas com VANT, apresentando melhores resultados em termos de consumo de energia em relação a seu antecessor. Ambas as soluções lidam com áreas de cobertura regulares (retângulos e polígonos simples) e não consideram o transporte e dispersão de agentes biológicos.

O trabalho de Valente et al. (2013) propõe uma solução para o planejamento de rotas de cobertura para a formação de mosaicos em agricultura de precisão, lidando com áreas mais complexas e irregulares, que podem incluir zonas de voo proibidas. Já a pesquisa de Barrientos et al. (2011) explora o planejamento de cobertura utilizando múltiplos VANTs com características variadas em áreas irregulares mais amplas. A área é dividida em subáreas designadas para cada veículo. Os veículos, por sua vez, exploram individualmente as suas respectivas subáreas sem qualquer tipo de comunicação ou coordenação entre eles. O trabalho exige a adoção de uma fronteira de segurança entre as subáreas, as quais os veículos são proibidos de sobrevoar para evitar a colisão entre eles. Apesar de lidarem com áreas mais complexas e adotarem múltiplos veículos, essas duas abordagens também não exploram o transporte e dispersão de agentes biológicos.

Na busca por patentes através do portal do Instituto Nacional da Propriedade Intelectual (INPI) foram encontradas algumas proposições, mas em sua maioria ainda sem concessão. Peter e Beitzen-Heineke (2020) propõem o desenvolvimento de um veículo terrestre equipado com um dispositivo de dispersão que se movimenta em linhas sobre o solo da cultura, sendo que as unidades biológicas são disparadas individualmente de maneira cronometrada. Nicodemo (2019, 2020) propõe um sistema embarcado multiuso para controle do processo de liberação de diferentes agentes biológicos, para automação do controle biológico de pragas através de meios convencionais (ex.: caminhando a pé e equipado com mochilas), de veículos terrestres (ex.: motos, tratores, uniport etc.), aéreos tripulados (ex.: aeronaves agrícolas, experimentais, outras de pequeno porte etc.) e aéreos não tripulados (ex.: VANTs). Apesar do dispositivo ser controlado por uma interface de comunicação padrão de sistemas de navegação e também ter a opção de conexão com interface humano-computador, a proposta não apresenta inovação em relação ao planejamento de missão com VANT integrado ao uso de dispensadores.

Machado e Matias (2019) propõem um sistema e um método para liberação de produtos sólidos, a granel ou com invólucro, para controle biológico de pragas na agricultura usando dispensadores acoplados ou incorporados a VANTs. No entanto, o VANT é remotamente pilotado por um operador humano. Matte e Santos (2019) também propõem um equipamento eletromecânico acoplável em VANTs para liberação de pulpas do agente biológico *Cotésia flavipes*, inimigo natural da lagarta do colmo, praga de plantas da família das *Poaceae*, principalmente da cana-de-açúcar. Novamente, a proposta foca na criação do dispositivo de dispersão sem apresentar inovação em relação à utilização manual do VANT como meio de transporte.

A pesquisa desenvolvida por Rangel (2016a, 2016b) utiliza VANT de asa fixa e rotativa, além de uma estação de controle para definir o plano de ação para o controle biológico. No entanto, a proposta não apresenta inovação no problema de planejamento da cobertura, uma vez que o plano de voo e a escolha do local de deposição dos inimigos naturais são realizados manualmente, o que exige mão de obra especializada, aumentando assim o tempo e o custo da missão. No trabalho proposto por Freitas et al. (2020) apresenta-se uma otimização de rota através da combinação

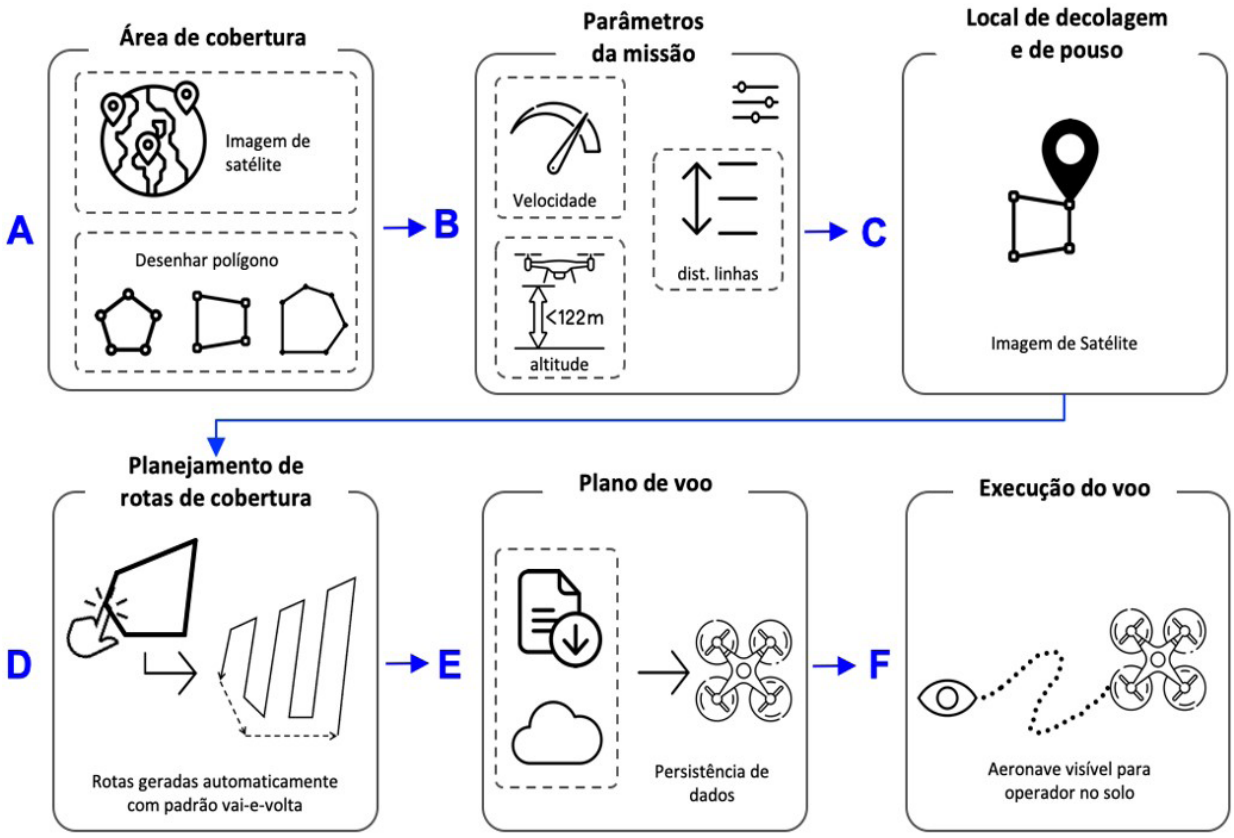


Figura 1. Diferentes etapas da aplicação web ORBIO.

de diferentes algoritmos para o lançamento de cápsulas contendo *Trichogramma*. Os locais de liberação das cápsulas foram calculados baseando-se no formato de hexágonos e a rota do VANT deve coincidir com o centro da forma geométrica. No entanto, o trabalho não considera a capacidade energética do veículo. Além disso, em áreas que exigem muitas manobras de virada, a abordagem proposta pode resultar em instabilidade na velocidade de voo e em aumento do consumo de energia. Esses aspectos são essenciais para o retorno seguro do veículo à base.

Zhan et al. (2021) propõem que um sistema de dispersão inteligente para cápsulas de *Trichogramma*. Os autores assumiram que a cobertura efetiva de uma cápsula é definida como uma área circular. A largura de operação e o intervalo de liberação do sistema de dispersão do VANT são formulados para o planejamento da rota, considerando o raio de cobertura da cápsula. O VANT realiza a cobertura de uma área previamente definida pelo operador humano em um sistema de posicionamento BeiDou[4] e executa o voo em um padrão de vai e volta. O experimento não trata dos problemas de retorno seguro da área para a base e não explora áreas de cobertura complexas. A maioria das propostas está diretamente relacionada à tecnologia de criação de dispositivos inteligentes de dispersão, sem apresentar uma solução inteligente integrada aos VANTs para otimizar o planejamento de missões. Em nossa abordagem proposta, já temos o dispositivo de dispersão de agentes biológicos e vamos lidar com o problema de planejamento da missão. Além disso, as soluções encontradas não exploram o potencial de otimização da cobertura para a construção de um plano de missão eficaz e seguro que amplie a área de atuação do veículo aéreo.

4 APLICAÇÃO WEB ORBIO

A aplicação web ORBIO foi desenvolvida com o intuito de gerenciar as missões de dispersão de agentes biológicos em áreas agrícolas e prover a automatização do planejamento de rotas de cobertura com VANTs para esse tipo de missão. A Figura 1 ilustra a sequência das etapas que constituem a estrutura da aplicação.

A seguir, uma breve explicação sobre cada etapa da estrutura da aplicação:

[4] BeiDou é um sistema chinês de posicionamento global por satélite, similar ao GPS norte-americano.

A. Área de cobertura: a área agrícola, na qual o controle biológico será realizado, é definida em um mapa com imagens de satélite através de uma ferramenta de desenho de polígonos;
B. **Parâmetros da missão:** os parâmetros da missão são velocidade, altitude, distância entre linhas e o tempo máximo de voo. Esses parâmetros são configurados de acordo com o tipo de missão;
C. **Local de decolagem e de pouso**: são os pontos de partida e de conclusão da rota. Podem ser definidos arbitrariamente por um operador humano, selecionando qualquer vértice do polígono definido na etapa (A);
D. **Planejamento de rotas de cobertura:** é realizado a partir da seleção do local de partida e da configuração dos parâmetros da missão. O algoritmo gera uma trajetória baseada em movimentos de vai e volta a partir do/até o local definido em (C). Além disso, calcula o tempo total de voo estimado, considerando a velocidade adotada e a distância percorrida pelo VANT;
E. **Plano de voo:** a rota de cobertura completa e pronta para o voo é salva em um arquivo no formato compatível com a maioria das controladoras de voo do mercado. O arquivo pode ser enviado para o VANT para a execução do voo pré-programado;
F. **Execução do voo:** a aplicação dos agentes biológicos sobre a área agrícola segue o voo elaborado pelo algoritmo.

As etapas da aplicação ORBIO apresentadas na Figura 1 visam a automatizar a tarefa de planejamento de rotas de cobertura para controle biológico, antes realizada de forma completamente manual pelo operador humano do VANT. Através da estrutura provida pela aplicação, o operador humano apenas realiza o pré-planejamento da missão ao definir a área de cobertura, configurar os parâmetros e escolher o local de decolagem/pouso nas etapas (A), (B) e (C). A partir disso, o algoritmo de cobertura baseado em movimentos de vai e volta se encarrega da geração automática da trajetória (D) de forma rápida, dinâmica e intuitiva. As etapas (E) e (F) representam a saída da aplicação como resultado do processo de planejamento.

O sistema ORBIO representa um avanço no campo de planejamento de rotas agrícolas, destacando-se por sua combinação de facilidade de uso e eficiência energética. Em contraste com outros softwares do mercado, o ORBIO disponibiliza uma interface web amigável que simplifica a geração de rotas de cobertura complexas em áreas de cultivo extensas, demandando apenas alguns cliques e proporcionando agilidade e praticidade aos operadores. O sistema também pode ser utilizado de forma *offline*, em dispositivos móveis, mesmo que esses dispositivos tenham uma configuração de hardware limitada. Através do ORBIO é possível desenhar polígonos no mapa e produzir rotas precisas que reduzem manobras desnecessárias e promovem economia de energia com padrões de voo em vai e volta projetados para diminuir as operações e o consumo energético durante as viradas. O sistema não só projeta uma rota completa, abrangendo decolagem, cobertura e pouso, mas também cria arquivos de *waypoint* prontos para uso, compatíveis com as principais controladoras de voo, facilitando a sua integração com VANTs de diferentes marcas e modelos. Essa interoperabilidade e celeridade destacam o ORBIO como uma solução distinta e eficaz no panorama de planejamento de rotas.

5. IMPLEMENTAÇÃO DA APLICAÇÃO

A aplicação web proposta foi implementada através de um sistema para verificação da eficácia da abordagem em um cenário real de controle biológico. O sistema pode ser utilizado de forma *offline* no campo, considerando que as fazendas brasileiras possuem duas grandes restrições principais: (1) a ausência de conexão com a internet durante a missão, cujo plano de voo pode necessitar de ajustes *in loco,* dependendo das condições do ambiente; (2) a necessidade do uso de computadores ou tablets de baixo custo que dificilmente teriam capacidade computacional necessária para processar tarefas de otimização.

O sistema é uma aplicação web baseada em Java Script que explora a API Mapbox GL[5] e a biblioteca Turf.js[6]. Através de uma interface intuitiva e amigável, é possível definir uma área de cobertura a partir do desenho de um polígono com alguns cliques em um mapa. Logo após a definição da área de cobertura, pode-se selecionar um dos vértices do polígono, também a partir de um clique, para a definição do ponto de decolagem e aterrisagem, assim como para a geração automatizada da rota de cobertura. A rota de cobertura consiste em movimentos de vai e volta alinhados com a maior aresta do polígono, o que garante melhor desempenho na execução do voo planejado em termos de tempo. A Figura 2 apresenta a interface do sistema.

[5] API é a sigla para A*pplication Programming Interface* (interface de programação de aplicação). A API do Mapbox pode ser acessada em Mapbox (2024).
[6] A biblioteca Turf.js pode ser acessada em Turf (2024).

Figura 2. Interface do sistema com rota de cobertura automatizada.

5.1 Delimitação da área de cobertura

O sistema apresenta uma interface de mapa de satélite com a mensagem "Desenhe um polígono" na parte central/superior da tela e um campo de formulário de pesquisa para selecionar um local específico para redirecionar o mapa no canto superior/direito. Botões de controle para aproximar/distanciar o mapa (ferramenta de zoom) estão disponíveis abaixo do campo de busca, assim como o botão de desenho do polígono e o botão da lixeira.

O usuário pode selecionar o botão de desenho do polígono e determinar a área a ser coberta clicando diretamente no mapa. Cada clique no mapa representa um vértice da área poligonal. Um duplo clique no último vértice finaliza o desenho do polígono. A linha laranja tracejada representa a área de cultivo a ser coberta pelo VANT. Uma vez finalizada a área poligonal, é possível selecionar e apagar vértices específicos usando o botão da lixeira. A Figura 2 apresenta a interface da aplicação.

5.2 Configuração de parâmetros da missão

O sistema contém quatro parâmetros de configuração da missão: altitude, velocidade, distância e tempo. O parâmetro "altitude" define a distância entre o VANT e o solo e seu valor varia entre 10 m e 50 m. O parâmetro "velocidade" configura a velocidade de voo do VANT para realizar a cobertura, variando de 1 m/s a 15 m/s. O parâmetro "distância" representa a distância entre as linhas paralelas do movimento de vai e volta e seu valor pode variar de 1 m a 100 m. Por fim, o parâmetro "tempo" representa o tempo máximo permitido para cada voo individual. O valor varia entre 5 e 20 minutos.

Se a rota gerada inicialmente exceder o limite de tempo adiciona-se um ponto de quebra em meio a rota e divide-se a rota original em duas sub-rotas – se a rota original for muito extensa, ela pode ser dividida em mais partes. Cada sub-rota gera um arquivo específico de pontos de rota a ser carregado no VANT. Ao executar as sub-rotas, o VANT sempre passa pelo ponto de quebra da rota original e retorna à base para troca de bateria. Logo após a escolha de um novo plano de voo da sub-rota subsequente, o VANT retoma a cobertura a partir do ponto de quebra anterior. Sendo assim, a soma de todas as sub-rotas equivale à rota originalmente gerada pelo algoritmo, com a exceção do acréscimo de pontos de quebra que interrompem momentaneamente a missão para um retorno seguro à base para troca de bateria.

O usuário deve configurar previamente os parâmetros de acordo com o tipo de missão utilizando o botão azul no canto inferior/direito. No entanto, a aplicação é flexível e também é possível alterar os parâmetros após a geração da trajetória. Nesse caso, o caminho de cobertura é renderizado novamente de acordo com os novos valores. A aplicação também permite que o usuário selecione um tipo de plantio com valores pré-definidos para os parâmetros. Além disso, há uma opção chamada "WP Grid" para gerar Pontos de Rota intermediários (PRI) ao longo do caminho. A distância entre os PRI é igual à distância

entre as linhas. Os PRI podem ser usados para ativar um comando específico na controladora do VANT, tal como abrir ou fechar um dispensador para espalhar agentes biológicos.

5.3 Seleção do ponto de decolagem e de aterrissagem

A posição de decolagem e de pouso é configurada selecionando-se um dos vértices do polígono. A Figura 2 apresenta o vértice selecionado destacado pelo círculo laranja maior no canto superior direito da área. Essa etapa ainda é realizada manualmente pelo usuário, considerando o seu conhecimento prévio sobre o campo de cultivo e seu entorno, como estradas, lagos e locais inacessíveis. Nem sempre essas informações encontram-se disponíveis e/ou atualizadas nos mapas obtidos através de imagens de satélite. Nessas circunstâncias faz-se necessário um reconhecimento do campo para o planejamento da missão antes da geração da rota através da aplicação.

A trajetória de cobertura consiste em três fases ilustradas por cores diferentes. A cor azul representa a fase inicial, na qual o VANT se desloca da posição de decolagem até o início do movimento de vai e volta. A cor amarela representa a fase intermediária composta por movimentos de vai e volta alinhados à maior aresta do polígono. Essa estratégia reduz o tempo de cobertura, que está diretamente relacionado ao número mínimo de manobras de virada. Por fim, a fase final é representada pela cor verde e indica o subcaminho que liga o ponto final do movimento de vai e volta e o ponto de pouso. As partes da trajetória de cobertura próximas aos limites externos da área não são colocadas sobre as arestas do polígono, mas posicionadas considerando a metade da distância entre as linhas para melhorar o desempenho da cobertura.

5.4 Informações dinâmicas de área, distância e tempo

Os dados da missão de cobertura estão disponíveis na parte superior central do mapa. Os dados são atualizados dinamicamente à medida que a área de cultivo e o caminho de cobertura são gerados ou modificados pela interação do usuário com a aplicação. A Figura 2 apresenta dados relativos ao tamanho da área (55,41 ha), comprimento total do trajeto (11,66 km) e tempo de voo (24 m 17 s).

É possível aumentar ou diminuir o parâmetro de distância, o que acarreta um aumento ou redução do número de linhas paralelas do movimento de vai e volta. Essa modificação também altera o comprimento total do trajeto e o tempo de voo para realizar a cobertura. Nesses casos, a rota inicialmente planejada é reconfigurada de acordo com os novos valores e redesenhada no mapa para visualização do usuário.

5.5 Opções de salvar e importar arquivos

O botão da missão (cor verde) localizado no canto inferior/esquerdo apresenta as várias opções. A opção "Novo" redefine os parâmetros e limpa o mapa. A opção "Salvar" armazena um ou mais arquivos no formato TXT com todos os pontos de rota e as coordenadas de área. Se o tempo de voo estimado da rota for menor que o parâmetro de configuração de tempo definido pelo usuário, apenas um arquivo de rota é salvo. No entanto, se o tempo de voo exceder o limite estipulado, faz-se necessário realizar mais de um voo a fim de cobrir toda a área sem riscos de energia. Nesses casos, um arquivo de rota é gerado para cada voo e cada voo cobre apenas uma parte da área de cultivo. O último ponto de rota de cada arquivo consiste no ponto de quebra que interrompe a cobertura e faz com que o VANT retorno à base para a troca de bateria. No momento da troca de bateria, altera-se o plano de voo para a realização do voo seguinte e assim por diante.

Também está disponível a opção "Salvar Rota Única", que salva em um único arquivo todos os pontos de rota, mesmo em coberturas que demandam vários voos. Esta opção é interessante para armazenar a rota completa original, que pode ser posteriormente carregada através da opção de "Abrir" da aplicação. A opção "Abrir" seleciona e abre um arquivo previamente salvo, permitindo modificações na área e na trajetória original. Todos os arquivos de rota são compatíveis com a maioria das controladoras de voo do mercado e contêm comandos como decolagem (código 22), mudança de velocidade (código 178) e movimentação para um determinado ponto de rota (código 16). Os arquivos também armazenam informações relacionadas a latitude, longitude, altitude e velocidade.

A opção "Importar Ponto" abre um arquivo KML e redireciona o mapa para o local, enquanto a opção "Importar Poly" desenha um polígono de acordo com as coordenadas existentes. Esses formatos de arquivo geralmente são gerados através de softwares de geolocalização, como o Google Earth. É possível editar o polígono clicando duas vezes com o botão direito e arrastando os vértices, e também excluir os vértices selecionando o botão da lixeira. Por fim, tem-se a opção "Importar MP", que permite ao usuário importar um arquivo criado no software de estação de controle Mission Planner, em que também podem ser desenhadas áreas de cobertura.

Por fim, a aplicação web ORBIO dispõe de uma "Central de Ajuda", que pode ser acessada através do

ícone em formato de sinal de interrogação, no lado direito. A Central de Ajuda possui um vídeo tutorial[7] com a demonstração completa de uso da aplicação. Além disso, a Central de Ajuda possui diversas seções/abas com a explicação de cada uma das opções presentes na aplicação. O manual completo contendo instruções detalhadas também pode ser encontrado no Github[8].

6 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO

Uma das principais vantagens da aplicação web proposta é que ela pode ser usada em dispositivos de baixo custo, até mesmo em smartphones. Por esse motivo é proposto um algoritmo com complexidade de ordem polinomial ao invés de técnicas de otimização, conforme apresentado na Figura 3. Essa abordagem significa que o tempo de processamento cresce proporcionalmente ao aumento do tamanho da entrada, mantendo-se gerenciável mesmo em dispositivos com hardware menos potente, evitando-se custos computacionais proibitivos associados a técnicas de otimização mais complexas[9]. Esta seção apresenta um algoritmo com complexidade de tempo $O(n^2)$, em que n é o número de vértices do polígono. Pela mesma razão, sua implementação é agnóstica, assim pode ser executada em diferentes plataformas. O Algoritmo 1 descreve o processo de vai e volta utilizado para a aplicação dos produtos de controle biológico.

A ideia geral da entrada do algoritmo consiste em um polígono representado por um conjunto de vértices $\{v_1, ...v_p\}$ e a posição inicial/final definida por P_{inicio}, indicando o local de decolagem e pouso para a missão. Cada vértice do polígono é representado por dois valores: latitude e longitude. O primeiro passo do algoritmo é calcular a aresta mais longa L_{aresta} do polígono e seu ângulo α considerando as coordenadas da área. A distância entre dois vértices consecutivos é medida e o processo é repetido até que todos os vértices sejam explorados. Alinhar o movimento de vai e vem de acordo com o ângulo da borda mais longa é importante porque melhora o desempenho da missão de cobertura, reduzindo o número de manobras de giro e, consequentemente, reduzindo o tempo de voo.

Então, na linha 3, o algoritmo desenha uma caixa delimitadora Q_{area} ao redor do polígono e gera linhas paralelas l_p dentro da caixa delimitadora (linha 4). Essas linhas paralelas são separadas entre si de acordo com o parâmetro de distância. Esse parâmetro define a distância entre as linhas. As linhas paralelas são giradas de acordo com o ângulo α da linha formada pela L_{aresta}, conforme mostrado na linha 5. Então, entre as linhas 6 e 10 exploramos todos os vértices do polígono e todas as linhas paralelas para descobrir os pontos de interseção i_p entre eles. Depois, modificamos todos os i_p (linhas 11 a 19) adicionando um recuo que é metade da distância entre as linhas. Isso é necessário para evitar as manobras de giro de cada segmento de linha sobre os limites da área poligonal, mantendo o caminho dentro do campo de cultivo delimitado. Cada dois pontos de interseção formam uma linha de segmento (linha 15). Se a linha for par, as coordenadas dos pontos são invertidas para criar o padrão de vai e vem (linha 17).

Por fim calculamos os subcaminhos da fase 01 e da fase 03 nas linhas 22 e 23, respectivamente. O subcaminho inicial consiste em um caminho do ponto inicial P_{inicio} até o primeiro ponto (ponto de interseção) f_p do movimento de vai e volta, passando por todos os vértices intermediários entre os dois pontos. Esse subcaminho também apresenta um recuo a partir dos limites do polígono, evitando passar pelas bordas. O subcaminho P_{final} consiste em um caminho do último ponto l_p do movimento de vai e vem até o P_{inicio}. Ao final do algoritmo, combinamos as três fases para gerar o caminho de cobertura completo, exportando um arquivo contendo um conjunto de waypoints $\{w_1, w_2 ... w_p\}$.

7 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

A partir da implementação do ORBIO descrita nas seções anteriores foi possível verificar a sua exequibilidade. A partir disso foram realizados experimentos com o intuito de validar a abordagem proposta. Planos de voo contendo rotas de cobertura foram elaborados e voos reais foram realizados sobre um campo de cultivo utilizando um VANT contendo um dispensador acoplado ao seu *frame*. O modelo de VANT empregado nos testes é um multirrotor personalizado com quatro motores (um quadricóptero) com um peso de aproximadamente 1,9 kg. O VANT possui quatro motores de 140 W, hélices de 9 polegadas e uma bateria de quatro células de 5000 mAh (14,8 V). O tempo de voo do VANT é de aproximadamente 20 minu-

[7] Link para o tutorial de uso da aplicação ORBIO no YouTube (2024).

[8] Link para o manual de uso da aplicação ORBIO em GitHub (2024).

[9] Métodos de otimização frequentemente empregam abordagens como algoritmos de tempo exponencial ou superpolinomial (Grötschel et al., 1993), que podem ser computacionalmente inviáveis em dispositivos com capacidade de processamento limitada. A escolha de um algoritmo polinomial assegura que, mesmo com recursos de hardware restritos, o sistema consegue calcular rotas de forma eficiente, garantindo uma performance consistente e previsível sem sacrificar a qualidade do planejamento.

Tabela 1. Comparação dos tempos de planejamento e execução de voos reais realizados manualmente e pelo aplicativo ORBIO.

Etapa avaliada	Manual	ORBIO
Confecção do plano de voo	maior que 5 min.	menor que 10 seg.
Alteração do vértice do polígono	maior que 1 min.	menor que 5 seg.
Alteração da posição de decolagem e de pouso	maior que 5 min.	1 seg.
Tempo de voo	cerca de 15 min.	cerca de 19 min.
Imprecisão na distância entre linhas (30 m)	18%	1%

Algoritmo 1 - ***Algoritmo vai-e-volta para controle biológico***

Entrada: Um conjunto de vértices $\{v_1, \ldots v_p\}$ e a posição inicial $p_{início}$

Saída: Um conjunto de waypoints $\{w_1, \ldots w_p\}$ e calcule aresta mais longa L_{aresta} do polígono

1: Calcular o ânglulo α de L_{aresta}
2: Crie um quadrado Q_{aresta} que delimita a área do polígono
3: Desenhe linhas paralelas lp dentro de Q_{aresta}
4: Gire as lp de acordo o ânglulo α de L_{aresta}
5: Para $i = 1$ até lp faça
6: Para $j = 1$ até vp faça
7: Calcule os pontos de interseção i_p até lp para cada v_j
8: fim para
9: fim para
10: Para $i = 1$ até i_p
11: d_{recuo} = metada da distância entre linhas
12: p_{bf}^{i} = Adicionar d_{recuo} às coordenadas de i_p^{ith}
13: p_{bf}^{i+1} = Adicionar d_{recuo} às coordenadas de i_p^{ith+1}
14: $linha$ = criar uma linha com p_{bf}^{i} e p_{bf}^{i+1}
15: Se $linha$ for PAR
16: Inverta as coordenadas de p_{bf}^{i} e p_{bf}^{i+1}
17: fim se
18: fim para
19: fp = primeiro ponto de i_p
20: lp = último ponto de i_p
21: Gerar o sub-caminho $P_{inicial}$ de $P_{início}$ para o fp
22: Gerar o sub-caminho P_{final} de lp para o $P_{início}$
23: Combine $P_{inicial}$, p_{bf}, e P_{final} para gerar o caminho de cobertura completo

Figura 3. Algoritmo vai-e-volta para controle biológico.

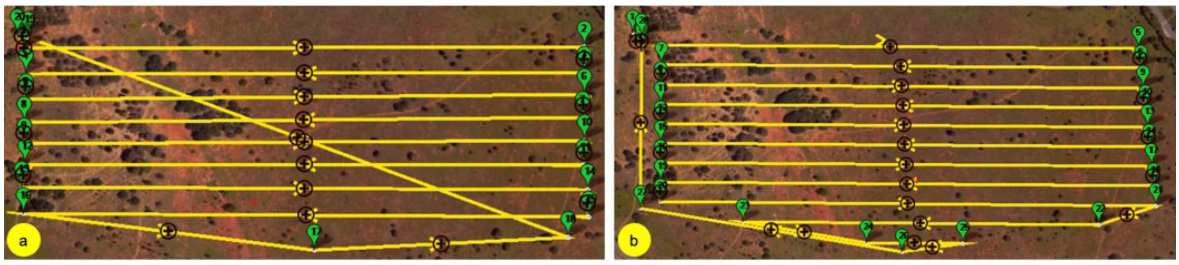


Figura 4. Voos reais realizados nos experimentos: (a) plano de voo elaborado manualmente por profissional com experiência; (b) plano de voo automatizado gerado pela aplicação ORBIO.

tos. A velocidade normal de voo é de 10 m/s, podendo chegar a 15 m/s se necessário. O equipamento é semelhante ao DJI Phantom 4 (DJI, 2024).

As características do VANT permitem a cobertura de uma área de até 30 hectares, embora os planos de voo geralmente não ultrapassem 20 hectares. O controle do VANT é realizado por uma placa controladora de voo Ardupilot (2024). A Tabela 1 apresenta os resultados com áreas que são retângulos quase regulares para mostrar o melhor caso para o ser humano, mas são minimamente realistas. Essas áreas são de aproximadamente 25 hectares. A distância entre as linhas para o controle biológico foi de 30 metros e a velocidade de voo do VANT foi de 10 m/s.

7.1 Implementação e usabilidade

Para a validação da abordagem proposta, compararam-se os planos de voo automatizados gerados pelo sistema com os planos de voo elaborados por profissionais com mais de cinco anos de experiência, especificamente no uso de VANT e gerenciamento de suas rotas para aplicação de controle biológico. A Figura 4 mostra dois exemplos de planos de voos elaborados nos dois contextos. A Figura 4a mostra um plano de voo gerado de acordo com o método de trabalho atual, ou seja, um plano elaborado de forma manual utilizando as ferramentas disponíveis em softwares de estação de controle. A Figura 4b, por sua vez, apresenta um plano de voo automatizado criado a partir da solução proposta (ORBIO). Diferentes formatos de áreas foram testados e quanto mais irregulares as áreas mais significativa foi a diferença entre o tempo de realização do percurso pelo operador humano, conforme esperado.

Na Tabela 1, os três primeiros resultados apresentados referem-se ao tempo de preparação ou adequação de um plano de voo a partir das informações das coordenadas GPS dos vértices das áreas, tais como confecção do plano de voo, alteração do vértice do polígono e alteração da posição de decolagem e de pouso. Como esperado, o tempo dessa etapa de preparação apresenta uma diferença bastante significativa entre as duas abordagens – manual e automatizada. É importante ressaltar que os polígonos envolvidos são simples e que o operador em questão possui muita experiência na tarefa. Além disso, ressaltamos que a operação de mudança de ponto de decolagem e pouso, que é muito frequente nesse tipo de operação, exige a criação de um novo plano, aumentando circunstancialmente o tempo de preparação quando realizado de forma manual.

7.2. Efetividade

Os experimentos apresentaram um resultado surpreendente na quarta linha da Tabela 1. O tempo de voo que culmina no uso da bateria costuma ser menor nos planos de voo elaborados de forma manual. Porém, analisando os planos apresentados, foi possível detectar uma dificuldade dos operadores humanos em fixar a distância entre as linhas de 30 metros em um valor constante na elaboração do plano de voo. A análise da Tabela 1 evidencia uma imprecisão de 18% na distância entre linhas de voo quando operadas manualmente, indicando dificuldades na manutenção da uniformidade do espaçamento. Esse aumento de espaçamento leva a um percurso reduzido e cobertura mais rápida pelo VANT, porém sacrifica a precisão em aplicações para o controle biológico, onde é imperativa a distribuição mais homogênea dos agentes.

Em contrapartida, o ORBIO oferece precisão aprimorada na configuração das rotas de cobertura, respeitando rigorosamente a restrição da distância entre as linhas. Tal precisão é ilustrada na Figura 4, que compara os planos sobre uma área idêntica; apesar dos planos visualmente assemelharem-se, as diferenças se manifestam significativamente no tempo de voo e na precisão, com disparidades evidenciadas pela Tabela 1.

8 CONCLUSÃO

O capítulo apresentou as características do aplicativo ORBIO, realizando uma avaliação de desempenho entre a solução proposta e o planejamento manual de rotas. A solução tecnológica é voltada para a automatização da dispersão de agentes biológicos em lavouras utilizando VANT. A interface do ORBIO é projetada para ser intuitiva, permitindo aos usuários gerar rotas de voo otimizadas com simples interações na tela. Testes realizados por pilotos de uma empresa parceira evidenciaram que a versão beta, ainda que disponibilizada restritivamente para validação operacional e coleta de *feedback*, já melhora consideravelmente a eficiência do planejamento de rotas. Resultados iniciais indicam uma melhora da agilidade na criação das rotas e uma redução significativa do erro humano nas distâncias entre linhas, de 18% para menos de 1%, aumentando significativamente a precisão no campo.

Esses avanços prometem aprimorar a aplicação de tratamentos biológicos e, olhando para o futuro, o ORBIO visa explorar o gerenciamento de rotas de cobertura em escala ampliada, procurando estratégias para segmentar extensões maiores em subáreas manejáveis para cobertura por múltiplos voos. Com o compromisso contínuo com a excelência, o ORBIO se prepara para estabelecer-se no mercado como uma solução de software como serviço (SaaS) para agricultura de precisão.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa Instrumentação, à Universidade Federal de Pelotas (UFPel), ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense (IFSul) e à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC). Também, pelo apoio financeiro, à BirdView Drone Bio Control.

REFERÊNCIAS

ARDUPILOT. 2024. Disponível em: https://ardupilot.org. Acesso em: 10 abr. 2024.

BARRIENTOS, A.; COLORADO, J., CERRO, J.; MARTINEZ, A.; ROSSI, C.; SANZ, D.; VALENTE, J. Aerial remote sensing in agriculture: a practical approach to area coverage and path planning for fleets of mini aerial robots. **Journal of Field Robotics**, v. *28*, n. 5, p. 667-689, 2011. DOI: http://doi.org/10.1002/rob.20403.

CABREIRA, T. M.; FRANCO, C. D.; FERREIRA, P. R.; BUTTAZZO, G. C. Energy-aware spiral coverage path planning for UAV photogrammetric applications. **IEEE Robotics and Automation Letters**, v. *3*, n. 4, p. 3662-3668, 2018. DOI: http://doi.org/10.1109/LRA.2018.2854967.

CAMPO E NEGÓCIO. **O Brasil é líder mundial em tecnologias de controle biológico?** Uberlândia, 2019. Disponível em: https://revistacampoenegocios.com.br/o-brasil-e--lider-mundial-em-tecnologias-de-controle-biologico/. Acesso em: 7 jun. 2022.

DI FRANCO, C.; BUTTAZZO, G. Coverage path planning for UAVs photogrammetry with energy and resolution constraints. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. *83*, n. 3-4, p. 445-462, 2016. DOI: http://doi.org/10.1007/s10846-016-0348-x.

DJI. **Phantom 4**. 2024. Disponível em: https://www.dji.com/phantom-4. Acesso em: 10 abr. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Controle biológico**. Brasília: EMBRAPA, 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/tema--controle-biologico. Acesso em: 4 abr. 2021.

FONTES, E. M. G.; VALADARES-INGLIS, M. C. **Controle biológico de pragas da agricultura**. Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **New standards to curb the global spread of plant pests and diseases**. Rome: FAO, 2019. Disponível em: https://www.fao.org/newsroom/detail/New-standards-to-curb-the-global-spread-of-plant-pests-and-diseases/en. Acesso em: 10 jun. 2020.

FREITAS, H.; FAIÇAL, B. S.; CARDOSO E SILVA, A. V.; UEYAMA, J. Use of uavs for an efficient capsule distribution and smart path planning for biological pest control. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *173*, p. 105387, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105387.

GITHUB. **Orbio-web/doc**. 2024. Disponível em: https://github.com/Orbio-web/doc. Acesso em: 10 abr. 2024.

GRÖTSCHEL, M.; LOVÁSZ, L.; SCHRIJVER, A. Complexity, oracles, and numerical computation. In: GRÖTSCHEL, M.; LOVÁSZ, L.; SCHRIJVER, A. (ed.). **Geometric algorithms and combinatorial optimization**. Berlin: Springer, 1993. p. 21-45. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-642-78240-4_2.

MACHADO, R. A. O.; MATIAS, N. R. **Sistema e método para liberação de produtos sólidos, a granel ou com invólucro, para controle biológico de pragas na agricultura usando dispensadores acoplados ou incorporados a veículos tripulados ou não-tripulados**. Depositante: Spitfire Multimidia S/S Ltda – Me. Procurador: Cesar Augusto Girardi Figueiredo. BR n. 10 2019 014753 9 A2. Depósito: 17 jul. 2019.

MAPBOX. **API do Mapbox**. 2024. Disponível em: https://www.mapbox.com. Acesso em: 10 abr. 2024.

MATTE, I. I.; SANTOS, M. R. F. **Equipamento automático, acoplável em vant, para liberação de pulpa de agentes biológicos em áreas agrícolas**. Depositante: Sirlene Maria de Oliveira (BR/SP). BR n. 20 2019 008594 6 U2. Depósito: 27 abr. 2019.

NICODEMO, F. G. **Sistema embarcado multiuso para liberação autônoma de agentes biológicos no controle biológico de pragas de precisão**. Depositante: Fernando Garcia Nicodemo. BR n. 10 2019 003863 2. Depósito: 25 fev. 2019.

NICODEMO, F. G. **Sistema para liberação de agentes biológicos no controle biológico de pragas**. Depositante: Fernando Garcia Nicodemo. BR n. 11 2020 008560 0. Depósito: 21 fev. 2020.

OBORNE, M. **Mission planner**. 2010. Disponível em: http://github.com/ArduPilot/MissionPlanner. Acesso em 10 mar. 2022.

PETER, B. F.; BEITZEN-HEINEKE, W. **Veículo de dispersão em grande superfície, de unidade de dispersão substancialmente esférica contendo organismos úteis apropriados para controle biológico**. Patent BR 10 2014 016416 2 B1. 01 Jul. 2014, 03 Mar. 2020.

PLAY NO AGRO. **Safra 24**: prejuízo superior a R$40 bi e ataque de pragas. 2024. Disponível em: https://playnoagro.com.br/safra-24prejuizo-superior-a-r40-bi-e-ataque--de-pragas. Acesso em: 10 abr. 2024.

EMBRAPA. **Brasil é líder mundial em tecnologias de controle biológico**. 2019. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/46366490/brasil--e-lider-mundial-em-tecnologias-de-controle-biologico. Acesso em: 25 out. 2024.

RANGEL, R. K. *Development of an UAVs distribution tools for pest's biological control "bug bombs!"*. *In*: 2016 IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 2016, Big Sky, MT, USA. **Proceedings** [...]. New York: IEEE, 2016a. p. 1-8.

RANGEL, R. K. Development of pest's biological control tool using Vtol UAV systems. In: ICAS CONGRESS 2016, Daejeon, Korea. **Proceedings** [...]. Bonn: ICAS, 2016b.

TURF. **Turf.js**. 2024. Disponível em: https://turfjs.org. Acesso em: 10 abr. 2024.

VALENTE, J.; SANZ, D.; DEL CERRO, J.; BARRIENTOS, A.; DE FRUTOS, M. A. Near-optimal coverage trajectories for image mosaicing using a mini quad-rotor over irregular--shaped fields. **Precision Agriculture**, v. *14*, n. 1, p. 115-132, 2013. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-012-9287-0.

YOUTUBE. **Demonstração da aplicação de planejamento de cobertura com drones (Embrapa/Birdview)**.

2024. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=DWsPhE_rRSk. Acesso em: 10 abr. 2024.

ZHAN, Y.; CHEN, S.; WANG, G.; FU, J.; LAN, Y. Biological control technology and application based on agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) intelligent delivery of insect natural enemies (*Trichogramma*) carrier. **Pest Management Science**, v. 77, n. 7, p. 3259-3272, 2021. DOI: http://doi.org/10.1002/ps.6371.

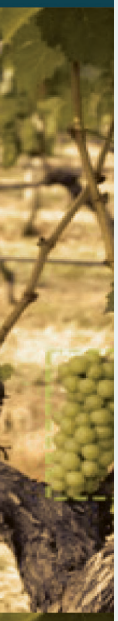
21

Avaliação da fertilidade de solos usando a espectroscopia de emissão óptica com plasma induzido por laser

Evaluation of soil fertility using laser-induced breakdown spectroscopy

Vinícius Câmara Costa[1], Alfredo Augusto Pereira Xavier[2], Kleydson Stênio Gaioso da Silva[3], Amanda Vieira Ribeiro[4], Mauro Henrique de Lima Filho[5], Guilherme Amorim Ventriche Favero da Silva[6], Paulino Ribeiro Villas-Boas[7], Ladislau Martin Neto[8], Aida Bebeachibuli Magalhães[9], Débora Marcondes Bastos Pereira Milori[10]

[1] *Doutor, Agrorobótica Fotônica em Certificações Ambientais, São Carlos (SP), Brasil, vinicius.costa@agrorobotica.com.br*
[2] *Doutor, Agrorobótica Fotônica em Certificações Ambientais, São Carlos (SP), Brasil, alfredo.xavier@agrorobotica.com.br*
[3] *Doutor, Agrorobótica Fotônica em Certificações Ambientais, São Carlos (SP), Brasil, kleydson.stenio@agrorobotica.com.br*
[4] *Graduada, Agrorobótica Fotônica em Certificações Ambientais, São Carlos (SP), Brasil, amanda.ribeiro@agrorobotica.com.br*
[5] *Graduado, Agrorobótica Fotônica em Certificações Ambientais, São Carlos (SP), Brasil, mauro.lima@agrorobotica.com.br*
[6] *Graduado, Agrorobótica Fotônica em Certificações Ambientais, São Carlos (SP), Brasil, guilhermeamorimvfs@agrorobotica.com.br*
[7] *Doutor, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, paulino.villas-boas@embrapa.br*
[8] *Doutor, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, ladislau.martin@embrapa.br*
[9] *Doutora, Agrorobótica Fotônica em Certificações Ambientais, São Carlos (SP), Brasil, aida.magalhaes@agrorobotica.com.br*
[10] *Doutora, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, debora.milori@embrapa.br*



RESUMO

A rápida determinação da fertilidade do solo auxilia na melhoria da produção agrícola e na redução de custo. Com o advento da agricultura de precisão e agricultura digital, novas demandas foram geradas utilizando sensores, métodos e protocolos para melhorar o tempo de análise e a produção agrícola. Nesse contexto, a espectroscopia de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS) é uma técnica promissora para a determinação da fertilidade dos solos, pois permite uma análise rápida e ambientalmente amigável. Nesse estudo, modelos de calibração multivariada usando a regressão por mínimos quadrados parciais (PLS) e regressão linear múltipla (MLR) foram propostos para a predição de 11 parâmetros de fertilidade de solos, incluindo: elementos extraíveis (Ca e Mg); pH ($CaCl_2$); acidez potencial (H+Al); soma de bases (SB); capacidade de troca de catiônica (CTC); saturação por bases (V%); saturação por alumínio (m%); matéria orgânica (MO); e textura (areia e argila). Modelos de calibração com bom desempenho foram obtidos para os 11 parâmetros de fertilidade, incluindo: R^2 (0,72 a 0,98); razão de desempenho interquartil (RPIQ) (2,7 a 9,5); além disso, os valores do erro quadrado médio de calibração (RMSEC) e erro quadrado médio de validação (RMSEV) estão numa faixa adequada e não afetam a precisão e exatidão das predições. Os resultados deste estudo indicam que a técnica LIBS em conjunto com os modelos propostos tem potencial para uso em laboratórios de rotina de solos, fornecendo resultados confiáveis, rápidos e de menor custo, uma vez que reduz o uso de reagentes químicos e geração de resíduos. Dessa forma, a técnica tem grande potencial para o mapeamento da fertilidade do solo em aplicações na área de agricultura de precisão. A caracterização da variabilidade espacial do solo em uma área agrícola requer a coleta de um grande número de amostras, o que pode demandar muito tempo, trabalho intenso e custos elevados com o uso das técnicas convencionais de análise. A técnica LIBS, por sua vez, pode gerar resultados em um período de tempo menor, com um trabalho relativamente rápido e a um custo menor.

Palavras-chave: LIBS; solos; fertilidade; PLS e MLR.

ABSTRACT

The rapid determination of soil fertility helps to improve agricultural productivity and reduces costs. With the recent emergence of precision and digital agriculture, greater demand has been generated stemming from the use of new sensors, methods and protocols for improving analysis time and agricultural productivity. In this context,

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000070

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) is a promising technique for rapid and environmentally friendly soil fertility analysis. In this study, multivariate calibration models using partial least square regression (PLS) and multiple linear regression (MLR) were proposed for the prediction of eleven soil fertility parameters, including: extractable elements (Ca and Mg); pH ($CaCl_2$); potential acidity (H+Al); sum of bases (SB); cation exchange capacity (CTC); base saturation (V%); aluminum saturation (m%); organic matter (OM); and texture (sand and clay). Strong-performing calibration models were obtained for the eleven fertility parameters, including: R^2 (0.72 to 0.98) and interquartile performance ratio (RPIQ) (2.7 to 9.5). Furthermore, the mean square error of calibration (RMSEC) and mean square error of validation (RMSEV) values presented an adequate range and did not affect prediction precision or accuracy. The results of this study show that the LIBS technique together with the proposed models have potential for use in routine soil testing, providing reliable, fast and cost-effective results by reducing the use of chemical reagents and waste generation. The technique shows great potential for mapping soil fertility in Precision Agriculture applications. Characterizing the spatial variability of soil in an agricultural area requires collecting a large number of samples, which can be time-consuming, labor-intensive, and costly when employing conventional analysis techniques. By contrast, the LIBS technique can generate results faster, with relatively quick execution and lower costs.

Keywords: LIBS; soils; fertility; PLS and MLR.

1 INTRODUÇÃO

A avaliação da fertilidade dos solos é um aspecto importante para a agricultura, uma vez que tem papel fundamental na produtividade de diferentes tipos de cultura. Tradicionalmente, essas análises são realizadas em laboratórios através de extrações ácidas ou básicas, usando técnicas que, embora acuradas, exigem preparação das amostras, são destrutivas, morosas, utilizam reagentes e geram resíduos. Anualmente, milhões de análises de diversos atributos relacionados à química, fertilidade e classificação do solo são realizadas no Brasi. Com o desenvolvimento da agricultura de precisão, a demanda por essas análises tem se tornado ainda maior. No entanto, com base nos métodos convencionais, realizar análises em muitas amostras requerem mais recursos financeiros, tempo e reagentes químicos que geram resíduos (Tavares et al., 2022).

Atualmente, existe uma demanda global por técnicas analíticas que permitem a caracterização química do solo de forma rápida, precisa e com baixa geração de resíduo químico. Nesse sentido, as técnicas analíticas de análise direta de sólidos, como a espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS), fluorescência de raio-X (XRF) e infravermelho visível e próximo (vis-NIR), têm se destacado. Dentre as técnicas mencionadas, a LIBS se sobressai, pois permite a determinação da constituição elementar do solo (por exemplo, C, N, P, K, Ca, Mg, Al e Fe). Além disso, os espectros LIBS podem ser usados para determinar parâmetros de fertilidade do solo, como: nutrientes extraíveis (ex-), pH, capacidade de troca de catiônica (CTC), matéria orgânica (MO), saturação por bases (%V) e também a determinação de características físicas como a textura (areia, argila e silte) (Tavares et al., 2022; Villas-Boas et al., 2016). Todavia, mesmo com os recentes avanços que a LIBS vem demonstrando nesse campo de atuação, ainda são poucos os trabalhos reportados na literatura, o que torna as novas contribuições essenciais para o avanço da tecnologia no campo da agricultura.

Apesar das vantagens da LIBS, os modelos de calibração precisam ser aprimorados, principalmente em solos que apresentam variações nas propriedades química e física que resultam em flutuações no sinal coletado, prejudicando os modelos de calibração convencionais univariados. Para superar esses problemas, o uso de modelos multivariados, como a regressão por mínimos quadrados parciais (PLS) e a regressão linear múltipla (MLR), são estratégias eficientes e ajudam a superar problemas gerados por efeito de matriz. Assim, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um protocolo de medida LIBS, usando modelos multivariados (PLS e MLR) que possibilitem a determinação dos principais parâmetros de fertilidade em solos, incluindo: elementos extraíveis (Ca e Mg); pH ($CaCl_2$); acidez potencial (H+Al); soma de bases (SB); capacidade de troca de catiônica (CTC); saturação por bases (V%); saturação por alumínio (m%); matéria orgânica (MO); e textura (areia e argila).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Instrumentação

O sistema LIBS utilizado neste estudo é uma tecnologia desenvolvida pela Agrorobótica, incluindo instrumentação, software e hardware. O sistema LIBS é composto por um laser pulsado de alta energia emitindo no modo fundamental de 1.064 nm, com energia máxima de 50 mJ, taxa de repetição de 10 Hz. Além disso, é composto por um espectrômetro de faixa espectral variando do ultravioleta profundo (UV) ao infravermelho médio (IR), entre 180 nm a 950 nm, com

resolução de 0,1 nm e equipado com um dispositivo de carga acoplada (CCD).

2.2 Amostragem e tratamento preliminar das amostras

As amostras de solo usadas para a proposição dos modelos foram amostradas em diferentes estados brasileiros, incluindo Maranhão, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, São Paulo e Paraná. Além da diferenciação geográfica, as amostras também são provenientes de diferentes manejos agrícolas, incluindo solos bem manejados e degradados. Nesse cenário, um total de 267 amostras de solos foi coletado. A amostragem contempla profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm que são comumente os alvos nas análises de fertilidade do solo.

Após a entrada no laboratório as amostras são submetidas a etapas de tratamento preliminar para posterior análise. O primeiro passo é a secagem das amostras a temperatura ambiente, por um período que pode variar entre 24 horas e 72 horas, dependendo da umidade das amostras e da classe textural. Apesar de ser uma etapa muito demorada, é o método de secagem mais adequado para solos, pois minimiza os efeitos da oxidação de espécies químicas. Após a secagem das amostras, toda a massa de solo deve ser moída com o auxílio de um moinho de martelos que rompe os torrões de solo, reduzindo o tamanho das partículas e aumentando a homogeneidade. Em seguida, as amostras previamente moídas são peneiradas em peneira com abertura de 2 mm, o que aumenta a uniformidade da distribuição das partículas, tornando-as mais homogêneas. Depois, as amostras são submetidas ao processo de remoção de resíduo vegetal (restos de raízes e folhas), realizada por processo de catação. Por fim, as amostras são adicionadas a um disco de análise que é introduzido em uma prensa hidráulica com pressão e tempo de prensagem otimizados, e na sequência as amostras são conduzidas para as medidas no sistema LIBS.

2.3 Método de referência

Para obtenção dos modelos de calibração, as amostras foram submetidas à análise por métodos de referência de fertilidade do solo. Nesse sentido, os atributos do solo foram determinados seguindo os métodos descritos por Van Raij et al. (2001), em que os elementos (Al, Ca, K e Mg) foram extraídos com cloreto de amônio (NH_4Cl) e posterior determinação por espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP OES); a MO do solos oxidada pela solução de dicromato de sódio e determinada por espectrofotometria; a textura do solo foi determinada pelo método de pipeta (argila, silte e areia); o pH com solução de cloreto de cálcio ($CaCl_2$); e a acidez potencial (H+Al) com solução tampão usando o método SMP. Os demais parâmetros como CTC, m%, SB e V% foram obtidos indiretamente a partir dos resultados dos métodos supracitados.

2.4 Proposição dos modelos de calibração

Neste estudo, a calibração por compatibilização de matriz (CM) utilizando modelos multivariados foi usada para a determinação dos parâmetros de fertilidade, incluindo: areia, argila, Ca, CTC, H+Al, m%, Mg, MO, pH, SB e V%. Normalmente, a CM é baseada em um conjunto de amostras com valores de referência que são obtidos a partir de técnicas analíticas bem estabelecidas. Essa estratégia é muito interessante e, em muitos casos, resolve problemas de efeito de matriz porque as próprias amostras são utilizadas para se obter a curva de calibração (Costa et al., 2018).

Para a proposição dos modelos de fertilidade, as amostras foram separadas em conjunto de calibração (154 amostras) e validação (40 amostras). Além disso, 73 amostras provenientes de uma área de produção agrícola coletada em São Tomás de Aquino/MG foram usadas para testar a capacidade preditiva dos modelos (predição externa). A seleção das amostras de solos utilizadas nos conjuntos mencionados foi feita aleatoriamente, a fim de não apresentar tendências que pudessem refletir na magnitude dos erros. Após a aquisição dos espectros LIBS provenientes dos conjuntos de calibração e validação, usamos o algoritmo de mapeador de ângulo espectral (SAM) para remoção de espectros outliers, eliminando uma média de dois espectros anômalos por amostra (Keshava, 2004; Stenio et al., 2022). Depos da eliminação do outlier, os espectros restantes foram utilizados para compor o espectro médio. Após essa etapa, várias linhas de emissão atômica (I) e iônica (II) de elementos geralmente constituintes dos solos (Al I 193.16, C I 193.03 e C I 247.86, 193.03 e 247.86, Ca II 315.88, Ca II 317.93, Ca II 318.12, Fe I 246,94, Mg II 279.55, Mg II 280.27, Mg I 285.21) foram selecionadas para compor os modelos de calibração, além disso a área do espectro de cada linha de emissão foi calculada. Posteriormente, as estratégias de calibração multivariada (PLS e MLR) foram usadas na proposição dos modelos de calibração. Abaixo são apresentados os modelos e as regiões espectrais selecionadas para os parâmetros de fertilidade avaliados.

- **Areia:** modelo PLS (9 variáveis latentes) usando o espectro inteiro (180 nm a 950 nm);
- **Argila**: modelo PLS (8 variáveis latentes) usando o espectro inteiro (180 nm a 950 nm);

- **Ca**: modelo MLR usando a área das linhas de emissão (Ca II 315.88, Ca II 317.93, Ca II 318.12);
- **CTC**: modelo PLS (8 variáveis latentes) usando o espectro inteiro (180 nm a 950 nm);
- **H+Al**: modelo PLS (7 variáveis latentes) usando o espectro inteiro (180 nm a 950 nm);
- **m%**: modelo PLS (7 variáveis latentes) usando o espectro inteiro (180 nm a 950 nm);
- **Mg**: modelo MLR usando a área das linhas de emissão (Mg II 279.55, Mg II 280.27, Mg I 285.21);
- **MO**: modelo MLR usando a área das linhas de emissão (Al I 193.16, CI 193.03, CI 247.86, Al I 193.16, Fe I 246,94);
- **SB**: modelo MLR usando a área das linhas de emissão (Ca II 315.88, Ca II 317.93, Ca II 318.12, Mg II 279.55, Mg II 280.27, Mg I 285.21);
- **pH**: modelo PLS (9 variáveis latentes) usando o espectro inteiro (180 nm a 950 nm);
- **V%**: modelo MLR usando a área das linhas de emissão (Ca II 315.88, Ca II 317.93, Ca II 318.12, Mg II 279.55, Mg II 280.27, Mg I 285.21);

2.5 Parâmetros de desempenho dos modelos

Parâmetros de desempenho analítico, como coeficiente de determinação (R^2), razão de desempenho interquartil (RPIQ), erro quadrado médio de calibração (RMSEC), erro quadrado médio de validação (RMSEV) e erro quadrado médio de predição (RMSEP), foram calculados para cada modelo de fertilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1(a-k) apresenta as concentrações de referência versus concentrações preditas para os modelos propostos, onde é possível observar boas correlações. As amostras do conjunto de calibração estão em preto, de validação em azul e predição em laranja.

A Tabela 1 apresenta as figuras de mérito calculadas para os modelos de fertilidade, além disso incluem comparativos dos valores de RMSEV obtidos neste estudo com os valores obtidos por Babos et al. (2024) e Tavares et al. (2022). Valores elevados de R^2 e RPIQ, juntamente com o baixo valor de RMSEC, RMSEV, RMSEP, indicam que os modelos são robustos e possuem boas capacidades preditivas.

Na ciência do solo, modelos com valores de RPIQ > 2,5 são considerados excelentes para previsões, modelos com valores de RPIQ entre 2,5 e 2,0 são considerados muito bons, modelos com valores de RPIQ entre 2,0 e 1,7 são considerados bons, modelos com valores de RPIQ entre 1,7 e 1,4 são considerados razoáveis e modelos com valores de RPIQ < 1,4 são considerados ruins. Os 11 modelos de calibração propostos apresentaram valores de RPIQ entre 2,7 e 9,5 indicando excelentes capacidades de predições

Os modelos de calibração apresentaram valores elevados de R^2 (0,72 a 0,98) para os 11 parâmetros de fertilidade do solo, indicando que as variáveis independentes selecionadas (regiões espectrais) apresentam correlação com os valores de referência da fertilida-

Tabela 1. Figuras de mérito dos modelos de calibração e validação para os parâmetros de fertilidade.

Modelos	Calibração (n = 154)			Validação (n = 40)			Predição externa			Babos et al., 2024	Tavares et al., 2021
	RMSEC	R^2	RPIQ	RMSEV	R^2	RPIQ	RMSEP	R^2	RPIQ	RMSEV	
Areia (g/kg)	48	0,97	8,2	56	0,96	7,2	56	0,89	2,8	*	*
Argila (g/kg)	31	0,98	9,5	53	0,96	6,9	64	0,83	2,7	*	30
Ca ($cmol_c/dm^3$)	0,6	0,95	3,6	0,7	0,94	2,9	0,4	0,86	5,5	0,9	0,5
CTC ($cmol_c/dm^3$)	0,8	0,94	4,7	1,1	0,97	3,5	0,8	0,63	3,3	1,0	1,0
H+Al ($cmol_c/dm^3$)	0,6	0,91	4,2	0,9	0,84	1,3	0,4	0,37	2,1	*	*
m%	11	0,72	2,7	13	0,60	1,9	2,0	0,29	1,5	*	*
MO (g/dm^3)	3,2	0,94	5,4	4,8	0,92	4,3	2,5	0,88	7,5	*	2,6
Mg ($cmol_c/dm^3$)	0,2	0,94	3,4	0,3	0,95	4,3	0,2	0,75	2,6	0,3	0,3
pH ($CaCl_2$)	0,2	0,92/	3,9	0,3	0,83	1,9	0,2	0,54	2,5	0,4	0,3
SB ($cmol_c/dm^3$)	0,6	0,95	4,0	0,8	0,93	3,4	0,4	0,85	6,1	1,1	*
V%	5,0	0,92	3,8	7,0	0,79	2,5	4,0	0,81	4,8	*	6,0

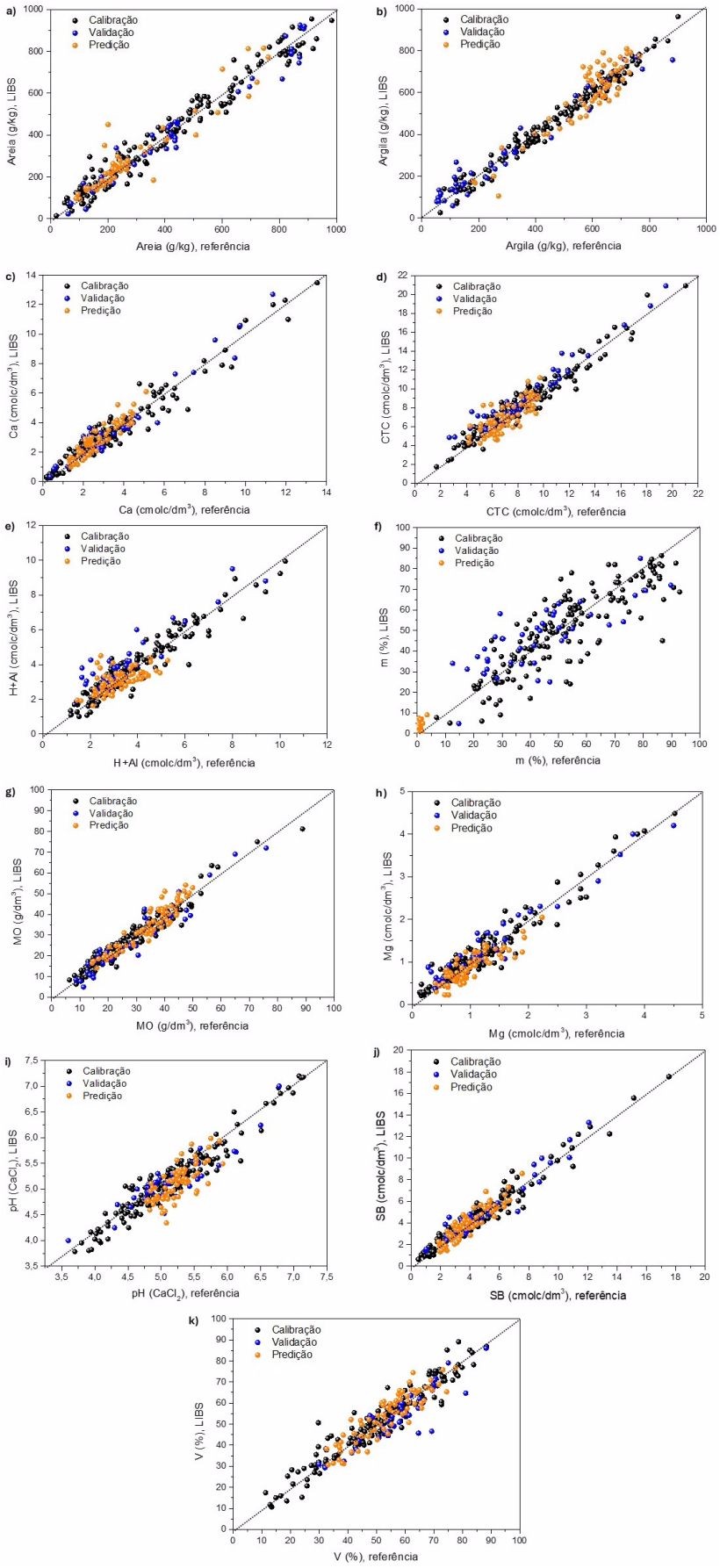


Figura 1. Concentrações de referência versus concentrações preditas pelos modelos para (a) areia; (b) argila; (c) Ca; (d) CTC; (e) H+Al; (f) m%; (g) MO; (h) Mg; (i) pH; (j) SB; (k) V%. As amostras de calibração e validação são representadas por quadrados (preto) e círculos (vermelho), respectivamente.

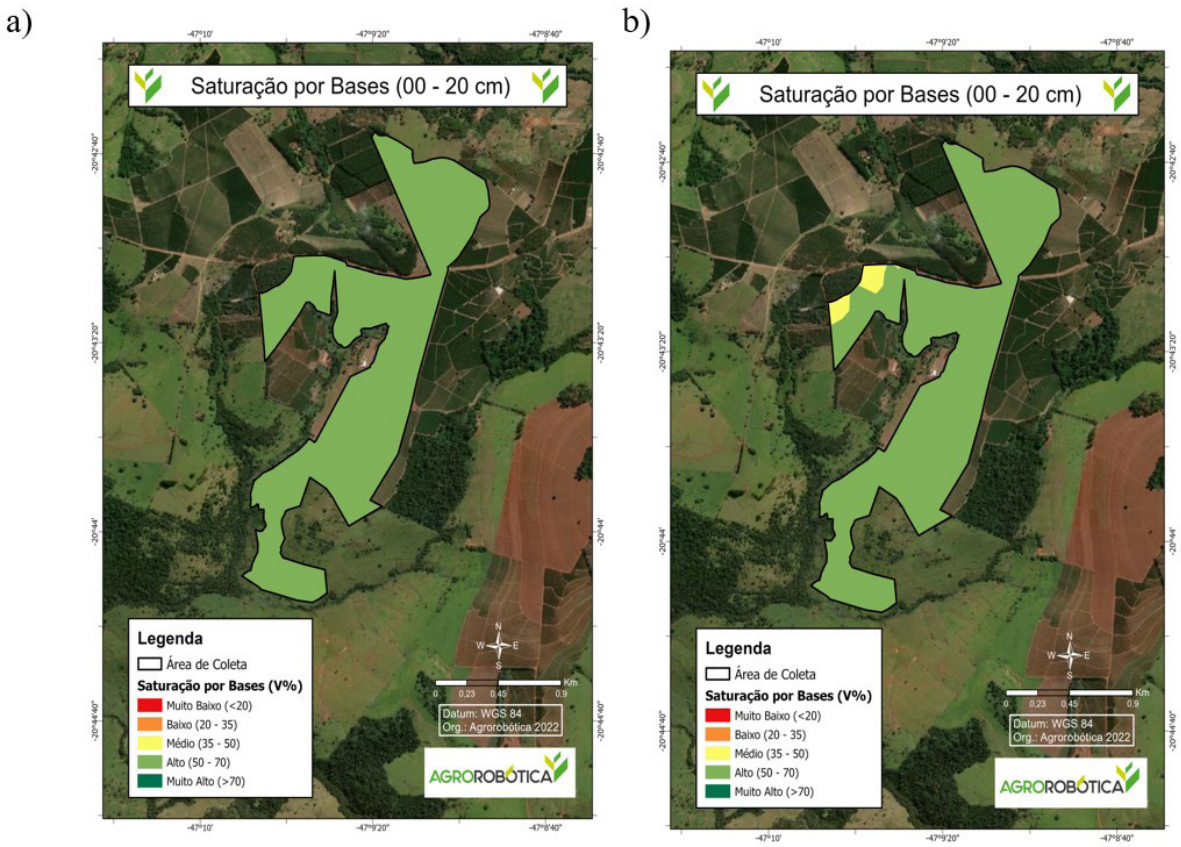


Figura 2. Mapa de teores para a saturação por bases (V%), usando os valores preditos pela LIBS (a) e método de referência (b).

de. Da mesma forma, foram observadas boas capacidades preditivas após análises do conjunto de validação ($0{,}60 \leq R^2 \leq 0{,}97$), demonstrando exatidões satisfatórias. Comparando os valores de RMSEV obtidos neste estudo (n = 40) (Tabela 1) com os trabalhos de Babos et al. (2024) (n = 39) e de Tavares et al. (2022) (n = 34) que utilizaram LIBS e calibração multivariada, verifica-se uma similaridade nos resultados.

Destaca-se que neste trabalho foi apresentada a primeira proposta de modelos de calibração com LIBS para a determinação de H+Al, m% e V%. A determinação de m% nos solos é de fundamental importância, principalmente para corrigir os problemas de alumínio em profundidade (20-40 cm), que acometem a maioria dos solos brasileiros. Outro parâmetro muito importante para os solos é a V%, que é responsável pela calagem, fornecendo ao solo cálcio e magnésio na camada superficial (0-20 cm) e aumentando o pH, o que aumenta a disponibilidade de nutrientes para a planta. A Figura 2(a-b), apresenta o mapa de teores para a V% com os valores LIBS (Figura 1a) e químico (método de referência) (Figura 1b), referente à área em que as amostras do conjunto de predição externa foram coletadas. É possível observar que, em toda a área delimitada, os teores de V% são semelhantes em ambas as figuras, mostrando a capacidade da LIBS em aplicações agronômicas.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho demonstra o potencial da técnica LIBS para a determinação de 11 parâmetros de fertilidade de solos, apresentando excelente desempenho analítico. Os resultados obtidos podem ser aplicados em laboratórios de análise de rotina de solos, permitindo uma análise nutricional completa. Dessa forma, a técnica LIBS tem grande potencial para o mapeamento da fertilidade do solo e utilização na agricultura de precisão, facilitando a criação de mapas de aplicação de fertilizantes a taxa variável.

A caracterização da variabilidade espacial do solo em uma área agrícola exige a coleta de um grande número de amostras, o que pode demandar muito tempo, trabalho intensivo e custos elevados com técnicas convencionais de análise. Em contraste, a técnica LIBS pode fornecer resultados em um período de tempo menor, com um trabalho relativamente rápido e a um custo reduzido.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Embrapa Instrumentação pela parceria e aos demais colaboradores que forneceram as amostras de solos.

REFERÊNCIAS

BABOS, D. V.; TADINI, A. M.; MORAIS, C. P.; BARRETO, B. B.; CARVALHO, M. A. R.; BERNADINI, A. C. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN-NETO, L. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) as an analytical tool in precision agriculture: evaluation of spatial variability of soil fertility in integrated agricultural production systems. **Catena**, v. *239*, p. 107914, 2024. DOI: http://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107914.

COSTA, V. C.; CASTRO, J. P.; ANDRADE, D. F.; BABOS, D. V.; GARCIA, J. A.; SPERANÇA, M. A.; CATELANI, T. A.; PEREIRA-FILHO, E. R. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) applications in the chemical analysis of waste electrical and electronic equipment (WEEE). **Trends in Analytical Chemistry**, v. *108*, p. 65-73, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.trac.2018.08.003.

KESHAVA, N. Distance metrics and band selection in hyperspectral pro-cessing with applications to material identification and spectral libraries. **Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, p. 1552-1565, 2024. https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.830549

STENIO K.; XAVIER, A.A.P.; MORAIS, C.P.; MILORI, D.M.B.P.; Carbon quantification in soils with different textures using laser-induced breakdown spectroscopy: spectral interference correction and use of a 3D plane model. **Analytical Methods**, v. 14, p. 4219-4229, 2022. https://doi.org/10.1039/D2AY01424F

TAVARES, T. R.; MOUAZEN, A. M.; NUNES, L. C.; SANTOS, F. R.; MELQUIADES, F. L.; SILVA, T. R.; KRUG, F. J.; MOLIN, J.P. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) for tropical soil fertility analysis. **Soil & Tillage Research**, v. *216*, p. 105250, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2021.105250.

VAN RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação de solos tropicais** Campinas: IAC, 2001.

VILLAS-BOAS, P. R.; ROMANO, R. A.; MENEZES, M. A. F.; FERREIRA, E. C.; FERREIRA, E. J.; CRESTANA, S.; MILORI, B. M. B. P. Laser-induced breakdown spectroscopy to determine soil texture: a fast analytical technique. **Geoderma**, v. *263*, p. 95-202, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.018.

22

Avaliação do modelo plano 3D para determinação de carbono em solos brasileiros utilizando um sistema LIBS automatizado para análise comercial em larga escala

Evaluation of the 3D plane model for determination of carbon in Brazilian soils using an automated LIBS system for large-scale commercial analysis

Kleydson Stênio Gaioso da Silva[1], Amanda Vieira Ribeiro[2], Vinícius Câmara Costa[3], Alfredo Augusto Pereira Xavier[4], Mauro Henrique de Lima Filho[5], Paulino Ribeiro Villas-Boas[6], Ladislau Martin Neto[7], Aida Bebeachibuli Magalhães[8], Débora Marcondes Bastos Pereira Milori[9]

[1] *Doutor, Agrorobótica Fotônica em Certificações Ambientais, São Carlos (SP), Brasil, kleydson.stenio@agrorobotica.com.br*
[2] *Graduada, Agrorobótica Fotônica em Certificações Ambientais, São Carlos (SP), Brasil, amanda.ribeiro@agrorobotica.com.br*
[3] *Doutor, Agrorobótica Fotônica em Certificações Ambientais, São Carlos (SP), Brasil, vinicius.costa@agrorobotica.com.br*
[4] *Doutor, Agrorobótica Fotônica em Certificações Ambientais, São Carlos (SP), Brasil, alfredo.xavier@agrorobotica.com.br*
[5] *Graduado, Agrorobótica Fotônica em Certificações Ambientais, São Carlos (SP), Brasil, mauro.lima@agrobotica.com.br*
[6] *Doutor, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, paulino.villas-boas@embrapa.br*
[7] *Doutor, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, ladislau.martin@embrapa.br*
[8] *Doutora, Agrorobótica Fotônica em Certificações Ambientais, São Carlos (SP), Brasil, aida.magalhaes@agrorobotica.com.br*
[9] *Doutora, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, debora.milori@embrapa.br*

RESUMO

O solo tem uma grande importância na mitigação dos gases do efeito estufa (GEE), uma vez que armazena pelo menos duas vezes mais carbono do que está contido na atmosfera na forma de dióxido de carbono (CO_2) e pode retê-lo por longos períodos. Nesse contexto, a Conferência Mundial do Clima de 2015, em Paris, lançou a iniciativa 4 por 1000 para promover uma rede voluntária global com foco em aumentar em 0,04% o estoque de carbono no solo e compensar o aumento anual nas emissões antropogênicas de CO_2 na atmosfera. Um dos maiores desafios dessa iniciativa é a disponibilidade de técnicas que permitam a mensuração, reporte e verificação do carbono estocado no solo de forma precisa, reprodutível e economicamente viável. Nesse contexto, a espectroscopia de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS) é uma técnica promissora para a determinação da fertilidade dos solos, pois é uma técnica de análise rápida e ambientalmente amigável. Neste estudo, o modelo plano 3D que é um caso particular de regressão linear múltipla (MLR) foi usado para a predição do carbono nas amostras de solos. O modelo plano 3D apresentou bom desempenho para as figuras de mérito avaliadas, incluindo: coeficiente de determinação (R^2); razão de desempenho interquartil (RPIQ); erro quadrático médio de calibração (RMSEC); e erro quadrático médio de validação (RMSEV). Os resultados deste estudo indicam que a técnica LIBS em conjunto com o modelo 3D tem potencial para a determinação de carbono em solos em escala comercial, fornecendo resultados confiáveis, rápidos e com baixo custo, uma vez que reduz o uso de reagentes químicos e geração de resíduos. Assim, a técnica de LIBS pode contribuir para o mapeamento do carbono visando a definição de zonas de manejo e a aplicação de insumos como fertilizantes, corretivos e sementes a taxa variável.

Palavras-chave: LIBS; modelo 3D; solos, carbono; espectroscopia.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000069

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

ABSTRACT
Soil is of great importance in mitigating greenhouse gases (GHG), since it stores at least twice as much carbon as is contained in the atmosphere in the form of carbon dioxide (CO_2) and can retain it for long periods. In this context, the 2015 UN Climate Change Conference in Paris launched the 4 per 1000 initiative to promote a global voluntary network focused on increasing soil carbon stocks by 0.04% and offsetting the annual increase in anthropogenic CO_2 emissions into the atmosphere. One of the biggest challenges of this initiative is the availability of techniques that allow us to accurately and economically measure, report and verify soil carbon stocks in a reproducible manner. Laser-induced plasma optical emission spectroscopy (LIBS) is a promising technique for determining soil fertility, being a fast and environmentally friendly analysis technique. In this study, the 3D planar model, which is a particular case of multiple linear regression (MLR), was used to predict carbon in soil samples. The 3D plane model showed good performance for the evaluated parameters, including: coefficient of determination (R^2); interquartile performance ratio (RPIQ); root mean square error of calibration (RMSEC); and root mean square error of validation (RMSEV). The results of this study indicate that the LIBS technique together with the 3D model show potential for determining soil carbon stocks on a commercial scale, providing reliable, fast and low-cost results, since it reduces the use of chemical reagents and waste generation. Thus, the LIBS technique can contribute to carbon mapping, aiming at defining management zones and the application of inputs such as fertilizers, soil treatments and seeds at variable rates.

Keywords: LIBS; 3D model; soils; carbon; spectroscopy.

1 INTRODUÇÃO

Na 21ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP 21) realizada em 2015, 195 países, entre eles o Brasil, e a União Europeia (UE) adotaram o Acordo de Paris. Nesse acordo, as partes se comprometeram em limitar o acréscimo da temperatura do globo terrestre ao máximo de 1,5 °C até o ano 2050. Para atingir essa meta é importante que os países signatários reduzam as emissões dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera até atingir um balanço nulo (Fransen et al., 2017).

O Brasil vem delineando diversas estratégias para poder cumprir as metas estabelecidas, desde o combate ao desmatamento até a implantação de um mercado regulamentado de créditos de carbono (Brasil, 2021). Mesmo com todos os desafios associados a essa agenda (Bolson; Araújo, 2022), o agronegócio surge como um grande parceiro dessas iniciativas devido ao seu potencial de mitigar GEE via sequestro de carbono pelo solo. Basta apenas a regulamentação desse mercado para incentivar mais produtores rurais a aderirem à iniciativa (Anis et al., 2022). A caracterização de carbono nos solos brasileiros é, então, essencial para viabilizar o mercado de crédito nacional, bem como para avaliar o desempenho do país com relação às metas de redução das emissões de GEE. No entanto, o sistema de monitoramento, reportagem e verificação (MRV) do estoque de carbono dos solos é um dos maiores desafios dos projetos de crédito de carbono em áreas agricultáveis pela falta de disponibilidade de técnicas analíticas que permitem a análise em escala do carbono em amostras de solos.

A técnica tradicional para mensurar carbono em solos é a análise elementar por combustão seca (CHNS). Entretanto, o preparo das amostras é laborioso e as análises individuais apresentam alto valor, o que poderia inviabilizar seu uso em larga escala. Nessa linha, técnicas fotônicas, como a espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS) e a espectroscopia de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS), se sobressaem por permitir análises rápidas, com pouco ou nenhum preparo de amostra, além de terem alto potencial para serem portabilizadas e embarcadas em sistemas comerciais. Em particular, o LIBS possui ainda mais vantagens por ser uma técnica multielementar, permitindo, em uma mesma análise, medir tanto o carbono no solo bem como diversos outros parâmetros, incluindo macronutrientes, micronutrientes, pH e textura do solo (Segnini et al., 2014; Buckley, 2015; Ferreira et al., 2015; Villas-Boas et al., 2016).

Em trabalho recente (Stenio et al., 2022), foi proposto um método para determinação de carbono em solos brasileiros com ampla variabilidade textural utilizando regressão linear múltipla (MLR), para o caso em que há apenas duas variáveis. Dessa forma, é possível gerar um plano no espaço (3D) e, a partir da sua equação, fazer predições com boas recuperações e poucos erros. Por fim, este trabalho busca avaliar se o uso desse método é eficiente para gerar bons resultados de predição de carbono, utilizando espectros medidos em um sistema LIBS automatizado para medidas em escala comercial. Do ponto de vista da agricultura de precisão, o mapeamento da matéria orgânica por talhão de produção pode auxiliar na definição de zonas de manejo, visando a aplicação especializada de insumos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Instrumentação

O sistema LIBS utilizado neste estudo é uma tecnologia desenvolvida pela Agrorobótica, incluindo a ins-

trumentação, software e hardware. O sistema LIBS é composto por um laser pulsado de alta energia emitindo no modo fundamental de 1.064 nm, com energia máxima de 50 mJ, taxa de repetição de 10 Hz. Além disso, é composto por um espectrômetro de faixa espectral variando do ultravioleta profundo (UV) ao infravermelho médio (IR), entre 180 nm a 950 nm, com resolução de 0,1 nm e equipado com um dispositivo de carga acoplada (CCD). O sistema LIBS da Agrorobótica tem uma frequência analítica de 1.000 amostras/dia, o que torna a tecnologia comercialmente viável.

2.2 Amostragem e tratamento preliminar das amostras

As amostras de solo usadas para a proposição dos modelos foram amostradas em diferentes estados brasileiros, incluindo Maranhão, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, São Paulo e Paraná. Além da diferenciação geográfica, as amostras também são provenientes de diferentes manejos, incluindo solos bem manejados e degradados. Nesse cenário, um total de 267 amostras de solos foram amostradas. A amostragem contempla profundidades de 00-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-60 cm e 60-80 cm.

Após a entrada no laboratório as amostras são submetidas a etapas de tratamento preliminar para posterior análise, de acordo a sequência a seguir:

(i) O primeiro passo é a secagem das amostras a temperatura ambiente, por um período que pode variar entre 24 horas e 72 horas, dependendo da umidade das amostras e da classe textural. Apesar de ser uma etapa muito demorada, é o método de secagem mais adequado para solos, pois minimiza os efeitos da oxidação de espécies químicas.

(ii) Após a secagem das amostras, toda a massa de solo deve ser moída com auxílio de um moinho de martelos que rompe os torrões de solo reduzindo o tamanho das partículas e aumentando a homogeneidade.

(iii) Em seguida, as amostras previamente moídas são peneiradas em peneira com abertura de 2 mm, o que aumenta a uniformidade da distribuição das partículas, tornando-as mais homogêneas.

(iv) Depois, as amostras são submetidas ao processo de remoção de resíduo vegetal que é realizada por processo de catação.

(v) Por fim, as amostras são adicionadas a um disco de análise que é introduzido em uma prensa hidráulica com pressão e tempo de prensagem otimizados, e na sequência as amostras são conduzidas para as medidas no sistema LIBS.

2.3 Método de referência

Para a obtenção dos modelos de calibração, todas as amostras de solos foram submetidas à caracterização química para determinação do carbono (%), usando um analisador elementar (CHNS) Perkin-Elmer modelo 2.400 Series II. Também foi realizada a caracterização física das amostras (areia, argila e silte), usando o método da pipeta. Para cada um dos parâmetros físicos foi atribuída uma classe textural – seguindo os manuais de recomendação da Embrapa e do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), que são referências nacionais (Camargo et al., 2009; Silva, 2009) –, de acordo com o seu valor de argila (variando de 0 a 1.000): muito arenosa (0-150 g kg^{-1}), arenosa (150-300 g kg^{-1}), média (300-400 g kg^{-1}), argilosa (400-600 g kg^{-1}) e muito argilosa (600-1.000 g kg^{-1}).

2.4 Proposição do modelo de calibração 3D

Neste estudo, a calibração por compatibilização de matriz (CM) utilizando o modelo 3D, que é uma variação da regressão linear múltipla (MLR), foi usada para a determinação do carbono. O modelo do plano 3D estabelece que a concentração de carbono em uma amostra é proporcional a intensidade de uma linha de emissão interferida e uma linha de emissão do interferente, por isso é como um modelo MLR. No entanto, seu diferencial é que ele assume que a linha do interferente deve de ser um dubleto ou tripleto da linha interferida (junto da emissão do carbono) e que o ponto (0, 0, 0) é pertencente ao plano (ou seja, coeficiente linear nulo). Com essas condições de contorno, o modelo se torna suficientemente robusto para determinação de carbono de amostras dos mais variados tipos de textura. Mais detalhes sobre o modelo plano 3D podem ser consultados na publicação de Stenio et al. (2022).

Para a proposição do modelo 3D, as amostras foram separadas em conjunto de calibração (123 amostras) e validação (43 amostras). Após a aquisição dos espectros LIBS provenientes dos conjuntos de calibração e validação, usamos o algoritmo de mapeador de ângulo espectral (SAM) para remoção de espectros outliers, eliminando uma média de dois espectros anômalos por amostra (Stenio et al., 2022). Após a eliminação do outlier, os espectros restantes foram utilizados para compor o espectro médio.

2.5 Parâmetros de desempenho do modelo 3D

Parâmetros de desempenho analítico, como coeficiente de determinação (R^2), razão de desempenho interquartil (RPIQ), erro quadrático médio de calibração (RMSEC) e erro quadrático médio de validação (RMSEV).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Amostras de solo são amostras geoquimicamente complexas do ponto de vista analítico. Mesmo considerando a mesma área (fazenda), a composição química (por exemplo, teor de óxidos de Fe, teor de carbonato de Ca e teor de fragmentos grossos) e a textura dos solos podem apresentar alta variabilidade devido às características intrínsecas, como: origem geológica, manejo utilizado e a profundidade da coleta.

Diante desse contexto, a determinação de carbono em solos por LIBS é um desafio. Além dos fatores supracitados, os espectros LIBS mostram apenas duas linhas de emissão fortes de carbono atômico CI, em 193,03 nm e 247,86 nm. Além disso, o CI em 193,03 nm é interferido pela emissão de Al (Al II 193,04 nm; Al I 193,16 e Al I 193,58), e o C I em 247,86 nm é interferido por uma linha atômica de Fe (Fe I 247,85 nm). Como os solos brasileiros são geralmente ricos em Al e Fe, a quantificação de carbono por LIBS pode ser desafiadora. O modelo 3D foi construído a partir da seleção de variáveis usando a área do pico da linha de emissão do C I em 193,03 nm e Al I 193,58 nm. Como já mencionado anteriormente, o modelo 3D é uma variação do MLR, que tem a habilidade de determinar o analito na presença do interferente, uma vez que o interferente esteja presente na calibração. Diante desse cenário, o uso da linha de emissão do Al I 193,58 nm no modelo de calibração é justificável.

A Figura 1 apresenta as concentrações de referência versus concentrações preditas para o modelo 3D, incluindo as amostras do conjunto de calibração (Figura 1a) e validação (Figura 1b). Além disso, também são apresentados os gráficos de resíduos deixados pelo modelo 3D, e aparentemente os resíduos são aleatórios (homocedásticos) em ambos os conjuntos de calibração (Figura 1b) e validação (Figura 1d). A Tabela 1 apresenta as figuras de mérito calculadas para o modelo 3D, além disso incluem comparativos dos valores de RMSEV obtidos nesse estudo (0,39%) com os valores obtidos por Stenio et al. (2022) (0,34%).

Tabela 1. Figuras de mérito do modelo 3D.

Modelo	Calibração (n = 123)			Validação (n = 43)			Stenio et al., 2022		
	RMSEC (%)	R^2	RPIQ	RMSEV (%)	R^2	RPIQ	RMSEV (%)	R^2	RPIQ
3D	0,36	0,84	2,5	0,39	0,80	2,1	0,34	0,93	* valor não calculado

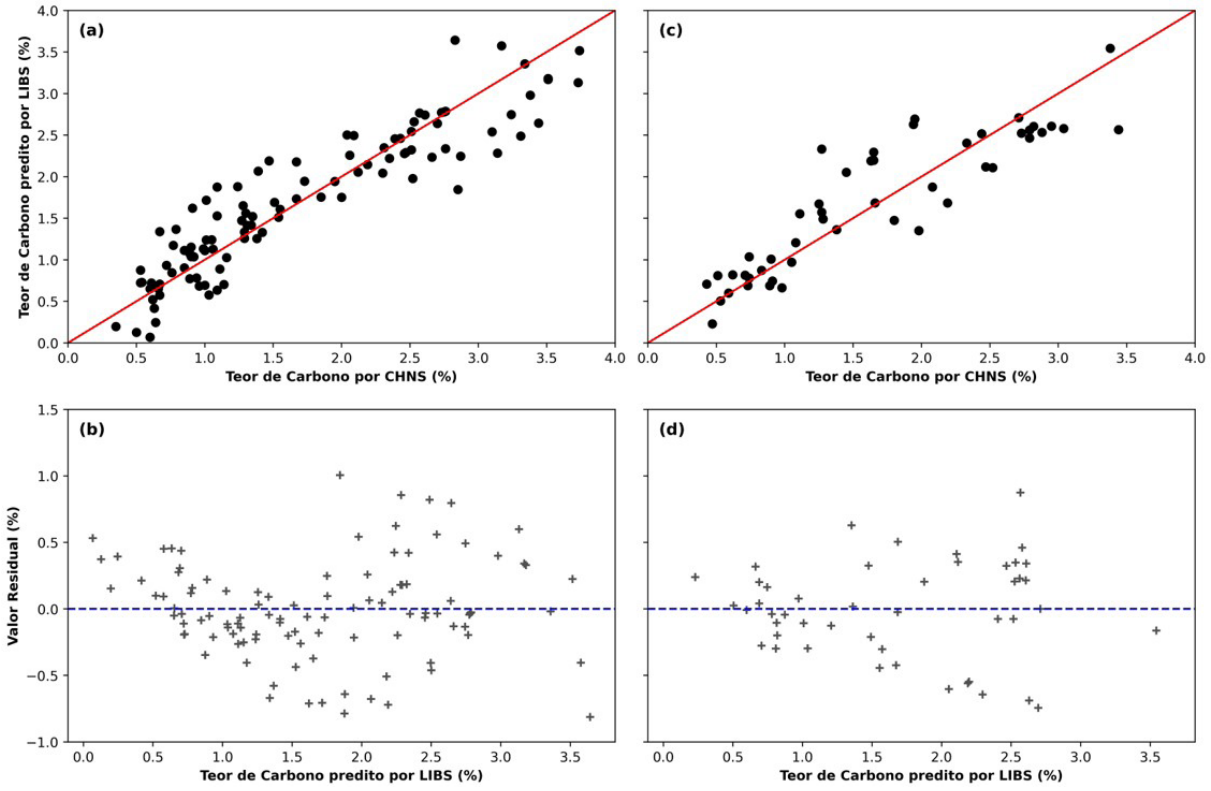


Figura 1. Gráficos de predição e resíduo para os conjuntos de calibração (a-b) e validação (c-d).

Valores adequados de R^2, RPIQ, RMSEC e RMSEV indicam que o modelo 3D é robusto e possui uma boa capacidade preditiva. Na ciência do solo, modelos com valores de RPIQ > 2,5 são considerados excelente para previsão, modelos com valores de RPIQ entre 2,5 e 2,0 são considerados muito bom, modelos com valores de RPIQ entre 2,0 e 1,7 são considerados bons, modelos com valores de RPIQ entre 1,7 e 1,4 são considerados razoáveis, e modelos com valores de RPIQ < 1,4 são considerados ruins. Neste estudo, o modelo 3D apresentou RPIQ de 2,5 e 2,1 para os conjuntos de calibração e validação, respectivamente, indicando uma capacidade de predição muito boa.

4 CONCLUSÕES

Os dados obtidos corroboram a hipótese de que é possível gerar predições de carbono em solos brasileiros de diversas classes texturais, utilizando um sistema LIBS automatizado para análises de solo em larga escala para a agricultura de precisão. Também o modelo de plano 3D se mostrou eficiente na calibração do equipamento, gerando resultados com boas correlações e baixos erros de predição.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Laboratório Nacional de Agro-Fotônica - LANAF (projetos CNPq 440226/2021-0 e Embrapa 20.24.00.059.00.00), a Embrapa Instrumentação, a Agrorobótica (projeto tipo III Embrapa 30.19.00.170.00.00), a FAPESP e a CAPES pelo fomento, bem como aos demais colaboradores que forneceram as amostras de solos.

REFERÊNCIAS

ANIS, C. F.; CARDUCCI, C. E.; RUVIARO, C. F. Mercado de carbono agrícola: realidade ou desafio? **Multitemas**, v. 27, n. 65, p. 163-188, 2022. DOI: http://doi.org/10.20435/multi.v27i65.3396.

Bolson, S.H.; Araújo, S.F.. As metas brasileiras ao acordo de paris sobre as mudanças climáticas e o desmatamento ilegal no bioma cerrado: a omissão do estado brasileiro. **RELPE: Revista Leituras em Pedagogia e Educação**, v. *5*, n. 1, p. 144-158, 2022.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei nº 528, de 23 de fevereiro de 2021**. Regulamenta o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE), determinado pela Política Nacional de Mudança do Clima – Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Brasília: Câmara dos Deputados, 2021. Disponível em: https://www.camara.leg.br/propostas-legislativas/2270639. Acesso em: 21 out. 2022.

BUCKLEY, S. G. Down to earth: measurements of geological, coal, and soil samples with LIBS. **Spectroscopy**, v. 30, n. 1, 2015.

Camargo, O. A.; Moniz, A. C.; Jorge, J. A.; Valadares, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. 2009. Disponível em: https://lab.iac.sp.gov.br/Publicacao/Raij_et_al_2001_Metod_Anal_IAC.pdf. Acesso em: 26 out. 2022.

Ferreira, E. C.; GOMES Neto, J. A.; Milori, D. M.; Ferreira, E. J.; Anzano, J. M. Laser-induced breakdown spectroscopy: extending its application to soil pH measurements. **Spectrochimica Acta. Part B, Atomic Spectroscopy**, v. *110*, p. 96-99, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.sab.2015.06.002.

Fransen, T.; Northrop, E.; Mogelgaard, K.; Levin, K. **Enhancing NDCS by 2020:** achieving the goals of the Paris Agreement. 2017. Disponível em: https://www.wri.org/research/enhancing-ndcs-2020-achieving-goals-paris-agreement. Acesso em 21 out. 2022.

SEGNINI, A.; XAVIER, A. A. P.; OTAVIANI-JUNIOR, P. L.; FERREIRA, E. C.; WATANABE, A. M.; SPERANÇA, M. A.; NICOLODELLI, G.; VILLAS-BOAS, P. R.; OLIVEIRA, P. P. A.; MILORI, D. M. B. P. Physical and chemical matrix effects in soil carbon quantification using laser-induced breakdown spectroscopy. **American Journal of Analytical Chemistry**, v. 5, n. 11, 2014. DOI: http://doi.org/10.4236/ajac.2014.511080.

Silva, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

Stenio, K.; Xavier, A. A. P.; Morais, C. P.; Milori, D. M. Carbon quantification in soils with different textures using laser-induced breakdown spectroscopy: spectral interference correction and use of a 3D plane model. **Analytical Methods**, v. *14*, n. 42, p. 4219-4229, 2022. DOI: http://doi.org/10.1039/D2AY01424F.

Villas-Boas, P. R.; Romano, R. A.; Menezes Franco, M. A.; Ferreira, E. C.; Ferreira, E. J.; Crestana, S.; Milori, D.M.B.P. Laser-induced breakdown spectroscopy to determine soil texture: a fast analytical technique. **Geoderma**, v. *263*, p. 195-202, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.018.

23 Quantificação nutricional foliar usando a espectroscopia de emissão de plasma induzido por laser

Leaf nutrient quantification using laser-induced breakdown spectroscopy

Luís Carlos Leva Borduchi[1], Débora Marcondes Bastos Pereira Milori[2], Maurício Conrado Meyer[3], Paulino Ribeiro Villas-Boas[4]

[1] *Acadêmico, Física, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), Brasil, luisleva@usp.br*
[2] *Pesquisadora, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil debora.milori@embrapa.br*
[3] *Pesquisador, Embrapa Soja, Distrito de Warta (PR), Brasil, mauricio.meyer@embrapa.br*
[4] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, paulino.villas-boas@embrapa.br*

RESUMO

A análise foliar é uma ferramenta importante para o monitoramento de nutrientes na produção de soja, pois permite a detecção de deficiências nutricionais, de contaminantes e de doenças. Devido ao alto custo das análises, ao longo tempo de processamento e à geração de resíduos químicos, técnicas quantitativas tradicionais, como a espectrometria de absorção atômica (AAS), limitam monitoramentos em larga escala. Uma alternativa é a espectroscopia de plasma induzido por laser (LIBS), uma técnica espectroanalítica que oferece análise multielementar de maneira rápida e com custo inferior à AAS, sem gerar resíduos químicos. O método é baseado no estudo da emissão óptica de plasma resultante da interação de um pulso de laser de alta fluência com a amostra. Apesar das vantagens, a técnica pode gerar resultados imprecisos devido aos efeitos de matriz. Neste trabalho, propomos o uso do modelo calibration-free (CF-LIBS) corrigido pelo método one-point calibration (OPC) para quantificar macro (Mg, Ca, K e P) e micronutrientes (Fe, Mn, B e Zn) em folhas de soja de várias cultivares e regiões coletadas. Embora os efeitos de matriz sejam evidentes na análise dessas amostras, obtivemos uma acurácia acima de 90% e R^2 maior que 0,79 para os diferentes nutrientes em relação à técnica AAS para 30 amostras de folhas de soja, usando o procedimento proposto. Os resultados deste estudo indicam que a técnica LIBS e o método proposto tem potencial para uso na agricultura de precisão, por ser rápida, de baixo custo e apresentar boa acurácia. Com poucas modificações nos modelos, os resultados deste trabalho podem ser expandidos para outras culturas e outros elementos, permitindo assim uma análise nutricional completa das folhas da cultura de interesse.

Palavras-chave: LIBS; análise foliar; CF-LIBS; soja.

ABSTRACT

Leaf analysis is a crucial tool for nutritional monitoring in soybean production due to its effectiveness in revealing nutrient deficiencies, contaminants and diseases. Traditional quantitative techniques, such as atomic absorption spectroscopy (AAS), are impractical for large-scale analysis due to their cost, lengthy processing time, and production of chemical residues. An alternative to these techniques is laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), a spectral analytical technique that offers a fast, low-cost, multi-element analysis without generating chemical residues. The technique is based on the study of the optical emission of plasma resulting from the interaction of a high fluence laser pulse with the sample. Even with its advantages however, the technique can generate imprecise results due to matrix effects. In this work, we propose the use of the calibration-free model (CF-LIBS) corrected with the one-point calibration (OPC) method to quantify macro (Mg, Ca, K and P) and micronutrients (Fe, Mn, B and Zn) in soybean leaves of various cultivars, collected from different regions. Although matrix effects were evident in the analysis of these samples, we obtained an accuracy of over 90% and R^2 higher than 0.79 for the different nutrients compared to the AAS technique for 30 soybean leaf samples using the proposed models. The findings of this study indicate that the LIBS technique with the proposed models has potential for use in precision agriculture because it is fast, low-cost, and accurate. With a few modifications, the models presented here can be expanded to other crops and elements, thereby providing a complete leaf nutritional analysis for the crop of interest.

Keywords: LIBS; leaf analysis; CF-LIBS; soybean.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000084

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

A avaliação nutricional em folhas de soja é de grande importância para a identificação de deficiências nutricionais, presença de contaminantes e na identificação de doenças em estágio assintomático. Atualmente, as técnicas utilizadas para realizar esta análise são a espectrometria de emissão atômica (AAS) e a espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). Embora tenham boa acurácia e precisão, estas técnicas demandam uma preparação de amostra que inclui digestão ácida e homogeneização por micro-ondas, além de possuírem um alto custo de análise.

Na agricultura de precisão, é necessária uma amostragem em larga escala, para as quais as técnicas de quantificação atuais não são adequadas devido ao alto custo de análise, geração de resíduos químicos e tempo de medida. Uma alternativa às técnicas tradicionais de quantificação é a técnica de espectroscopia de emissão de plasma induzido por laser (do inglês *laser-induced breakdown spectroscopy* – LIBS). A técnica LIBS se baseia no estudo da emissão gerada por um plasma na superfície da amostra. Com esta técnica, é possível realizar análises qualitativas e quantitativas dos elementos da amostra, classificar doenças em folhas de plantas e estimar parâmetros do solo, tais como pH e textura (Villas-Boas et al., 2019). Os diferenciais da técnica são: i) pouco preparo de amostra, que permite realizar análises diretamente na amostra sem extrações; ii) análise rápida e de baixo custo; e iii) sem geração de resíduos químicos. Estas são vantagens que tornam a técnica promissora para análises em larga escala.

Apesar das vantagens, a técnica ainda não está bem estabelecida, principalmente para análise de folhas de plantas. Variações nas propriedades químicas e físicas das amostras provocam flutuações no sinal coletado, prejudicando os modelos analíticos convencionais, como as curvas de calibração, onde a concentração do elemento é correlacionada com o sinal coletado pela técnica LIBS. Assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver um protocolo de medida com LIBS que possibilite quantificar, em folhas de soja, macros e micronutrientes, incluindo: cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), fósforo (P), boro (B), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn). Para este estudo, utilizamos um sistema LIBS duplo pulso (DP-LIBS) e desenvolvemos modelos de quantificação livre de calibração (do inglês *calibration-free* – CF-LIBS) (Ciucci et al., 1999), corrigido pelo método de um ponto de calibração (do inglês *one-point calibration* – OPC) (Borduchi et al., 2019).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Modelos quantitativos

Calibration-free (CF-LIBS) é um modelo quantitativo que leva em consideração os parâmetros físicos do plasma e das linhas de emissão. Ele se baseia no equilíbrio termodinâmico local do plasma, assumindo que espécies pesadas como elétrons, átomos e íons podem ser descritos pela mesma temperatura. Além disso, ele requer um número adequado de elétrons livres para permitir a troca de energia através de colisões de partículas e uma relação estequiométrica entre a amostra e o plasma.

One-point calibration (OPC) é um modelo de correção empírica aplicado ao CF-LIBS. Seu principal objetivo é calibrar as linhas de emissão, considerando o equilíbrio térmico, e corrigir problemas relacionados a alguns parâmetros das linhas de emissão. Esses problemas incluem o valor desconhecido da função do espectrômetro $F(\lambda)$ para converter valores de intensidade arbitrários em W cm^{-2}; a imprecisão do coeficiente de emissão espontânea de Einstein; autoabsorção e absorção de fótons por uma molécula no caminho óptico até a fibra de coleta. Valores incorretos desses parâmetros podem levar a cálculos de temperatura errôneos, afetando assim a quantificação. Diferentemente dos modelos tradicionais (Cremers; Radziemski, 2013), em que é necessário um conjunto de calibração, o CF-LIBS com o método OPC requer apenas uma amostra com concentração conhecida dos elementos de interesse para calibrar os fatores do OPC. A quantificação via CF-LIBS é realizada com base na concentração do padrão interno como referência para as concentrações dos outros elementos. Mais detalhes podem ser encontrados no trabalho de Borduchi et al. (2019).

3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados obtidos pelo modelo proposto foram avaliados através da acurácia, erro médio relativo quadrático, RMSRE, e o coeficiente de determinação, R^2, definido como:

$$Acurácia = 100\% \left(1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{\left| C_i - \widetilde{C_i} \right|}{C_i} \right) \quad (1)$$

$$RMSRE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{C_i - \widetilde{C_i}}{C_i} \right)^2} \quad (2)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} (C_i - \underline{C})(\widetilde{C}_i - \underline{\tilde{C}})}{\sum_{i=1}^{N} (C_i - \underline{C})^2 \sum_{i=1}^{N} (\widetilde{C}_i - \underline{\tilde{C}})^2} \right]^2 \quad (3)$$

4 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Utilizamos 30 amostras de folhas de soja coletadas em diferentes regiões do Brasil e de diferentes cultivares (Tabela 1). As amostras foram coletadas no campo e levadas ao laboratório, onde foram limpas, secas em estufa a 36 °C durante 72h, trituradas com auxílio de nitrogênio líquido, almofariz e pistilo e peneiradas a 35 *mesh* (malha de 0,5 mm). Para facilitar os cálculos do OPC, foi adicionado 0,5wt% de dióxido de titânio. A mistura foi homogeneizada e prensada, resultando em uma pastilha de 300 mg e 12,5 mm de diâmetro. O processo de preparo da amostra é ilustrado na Figura 1.

5 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE AAS

A espectrometria de absorção atômica (AAS) foi utilizada como técnica-padrão para quantificar os níveis os nutrientes nas amostras. Para conduzir as análises de AAS, as amostras secas em estufa a 36 °C durante 72h, trituradas com auxílio de nitrogênio líquido, almofariz e pistilo e peneiradas a 35 *mesh* (malha de 0,5 mm), posteriormente, foram submetidas à digestão com ácido nítrico (HNO_3) por um período de 4 horas, usando um bloco digestor a 140 °C, seguido de oxidação com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) por mais 4 horas a 140 °C no mesmo bloco digestor. Após o resfriamento, as soluções digeridas foram filtradas, diluídas com água Milli-Q e armazenadas em tubos selados. Os teores nutricionais foram determinados usando um AAS Perkin Elmer PinAAcle™ 900 T, que operava no modo de absorção de chama. O software do equipamento foi usado para realizar automaticamente todos os tratamentos de dados necessários, como correção de fundo e média de três réplicas.

6 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE LIBS

Para as medidas LIBS, foi utilizado o sistema DP-LIBS, composto por um laser *Q-switched* de Nd:YAG operando em 1064 nm (infravermelho), 50 mJ de energia de pulso, 8 ns de duração de pulso e fluência de 510 J cm^{-2}; e um laser *Q-switched* de Nd:YAG acoplado a um gerador de segundo harmônico operando em 532 nm (verde), 60 mJ de energia de pulso, 4 ns de duração de pulso e fluência de 950 J cm^{-2}. O sistema DP-LIBS possui ainda um espectrômetro Aryelle com faixa espectral de 175-760 nm com precisão de 13-24 pm, acoplado com uma câmera iCCD com resolução de 1024 × 1024 pixels. Os espectros LIBS foram processados usando o software R para remoção de *outliers*, correção da linha de base e cálculo das áreas das linhas de emissão. Os parâmetros das linhas de emissão foram obtidos a partir da base de dados do *National Institute of Standards and Technology* (NIST) (Kramida et al., 2018). O processo completo de medida LIBS e processamento de dados pode ser visualizado na Figura 2.

Tabela 1. Características das amostras de cada conjunto.

Conjunto	N° Amostras	Cultivar	Localização (Brasil)
1	01 – 09	D7712244	Severínia – SP
2	10 – 18	TMG1182RR	Balsas – MA
3	19 – 20	P98Y70	Mata Verde – MG
4	21 – 25	M9144RR	Paragominas – PA
5	26 – 30	ST820RR	São Carlos – SP

Figura 1. Processo de preparo da amostra para a técnica LIBS, desde a coleta das amostras no campo até o seu preparo no laboratório com almofariz e pistilo, resultando em uma pastilha.

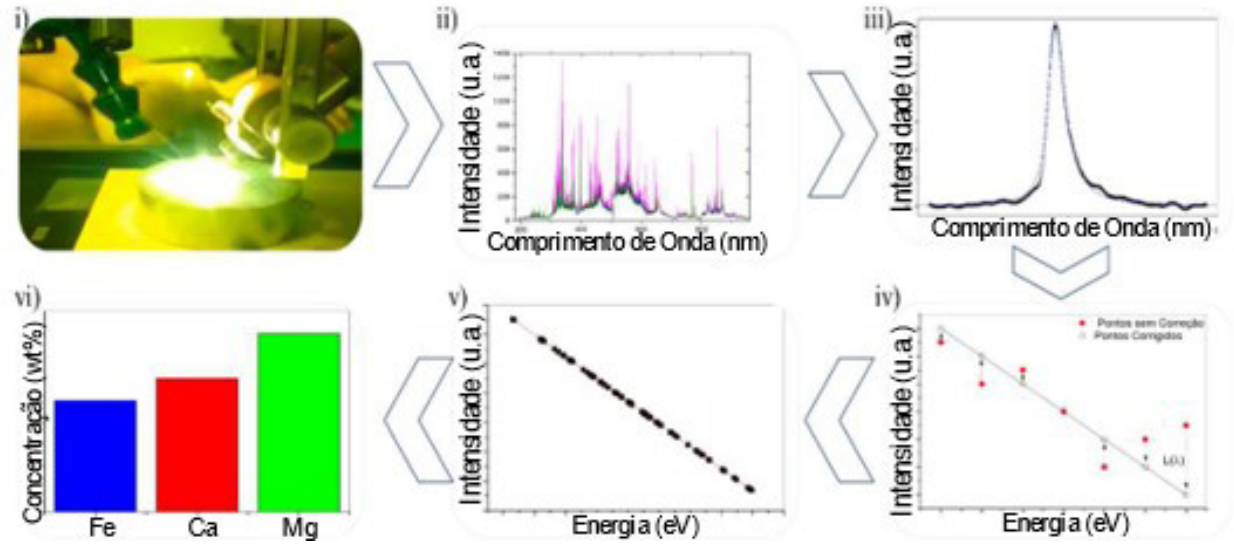


Figura 2. Fluxograma mostrando: i) medida LIBS, ii) tratamento dos espectros, iii) correção da linha de base e cálculo das áreas das emissões dos elementos, iv) calibração pelo OPC, v) cálculo dos parâmetros do plasma, vi) quantificação dos elementos interesse.

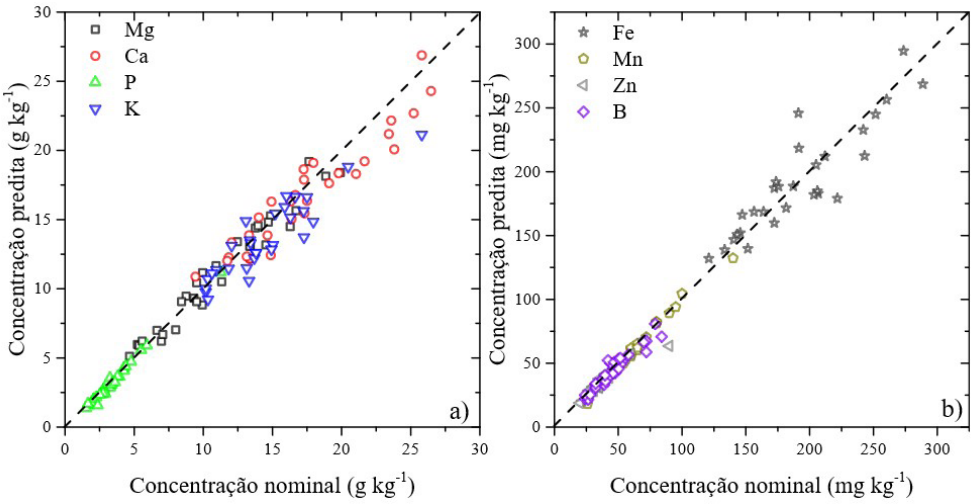


Figura 3. Comparação da concentração de nutrientes em folhas de soja predita pelo método CF-LIBS com a técnica de AAS, para os: a) macros e b) micronutrientes.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho, propomos o uso do sistema DP-LIBS com o modelo CF-LIBS corrigido pelo método OPC para quantificar macros (Mg, Ca, K e P) e micronutrientes (Zn, B, Mn e Fe) em 30 amostras de folhas de soja coletadas em diferentes regiões do Brasil e de diferentes cultivares. Através do procedimento proposto, foi possível quantificar todos os nutrientes utilizando apenas uma amostra com concentração conhecida para calibrar o método OPC.

Utilizando o modelo CF-LIBS com o método de correção OPC, foi realizada a quantificação dos nutrientes e validados com os valores da técnica de referência AAS (Figura 3). A acurácia (equação 1) do modelo proposto foi acima de 90%, com R^2 maior que 0,79 para a quantificação de oito nutrientes importantes para a cultura de soja (Tabela 2). O erro médio relativo ao quadrático de predição do modelo foi menor que 9,4%, que é equivalente ao da técnica AAS. Estes resultados indicam que LIBS apresenta precisão e acurácia similar à da técnica de AAS, mas com custo de análise inferior e a vantagem de não gerar resíduos químicos. A comparação do modelo CF-LIBS com o método de correção OPC, em relação aos modelos de calibração convencionais utilizados em LIBS com curvas de calibração, pode ser encontrada em Borduchi et al. (2022).

Apesar de a soja ser uma cultura anual, ao realizar a quantificação foliar é possível estabelecer o melhor manejo para a próxima safra, corrigindo possíveis problemas de déficits nutricionais, infestações e toxidade do solo, que podem acarretar perdas na produtividade. Além disso, com pequenas modificações, os resul-

Tabela 2. Acurácia e coeficiente de determinação (R^2) para os macros e micronutrientes.

Macronutrientes				Micronutrientes			
Elemento	Acurácia (%)	RMSRE (%)	R^2	Elemento	Acurácia (%)	RMSRE (%)	R^2
Ca	92	8,8	0,89	Fe	90	9,4	0,79
Mg	91	9,1	0,96	B	92	9,1	0,90
K	90	9,3	0,82	Mn	92	8,5	0,98
P	91	8,1	0,98	Zn	93	9,4	0,89

tados deste trabalho podem ser estendidos para outros elementos e para culturas perenes, em que é necessária uma avaliação nutricional frequente para garantir uma boa colheita e qualidade do produto cultivado.

Considerando os pontos citados acima, a técnica LIBS possui grande potencial para realizar análises nutricionais em larga escala de folhas de plantas e permitir assim a adoção de práticas da agricultura de precisão. A técnica possibilita ainda a análise nutricional de grandes áreas e a construção de mapas de déficits nutricionais, infestação e toxidade, garantindo um manejo adequado e individualizado para cada parte da lavoura.

8 CONCLUSÕES

Este trabalho demonstra o potencial da técnica LIBS para realizar quantificação de nutrientes em folhas de soja. Foram obtidos uma acurácia acima de 90%, RMSRE maior que 9,4%, e R^2 maior que 0,79 para os valores preditos de concentração dos nutrientes em relação à técnica AAS. Com poucas modificações, os resultados deste trabalho podem ser expandidos para outras culturas e outros elementos, permitindo assim uma análise nutricional completa das folhas da cultura de interesse.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Embrapa instrumentação (Embrapa 20.24.00.059.00.00), projeto tipo III com a Agrorobótica (Embrapa 30.20.90.029.00.00) e pelas agências de fomento CNPq (projetos 312775/2021-0, 40226/2021-0, 1133163/2021-0, 434380/2018-0 e 312647/2018-2) e Fapesp (projetos 2022/05451-0 e 2013/07276-1).

REFERÊNCIAS

Borduchi, L. C. L.; Milori, D. M. B. P.; Meyer, M. C.; Villas-Boas, P. R. Reducing matrix effects on the quantification of Ca, Mg, and Fe in soybean leaf samples using calibration-free LIBS and one-point calibration. **Spectrochimica Acta. Part B, Atomic Spectroscopy**, v. *198*, p. 106561, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.sab.2022.106561.

Borduchi, L. C. L.; Milori, D. M. B. P.; Villas-Boas, P. R. One-point calibration of Saha-Boltzmann plot to improve accuracy and precision of quantitative analysis using laser-induced breakdown spectroscopy. Spectrochim. Acta - Part B At. **Spectrochimica Acta. Part B, Atomic Spectroscopy**, v. *160*, p. 105692, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.sab.2019.105692.

Ciucci, A.; Corsi, M.; Palleschi, V.; Rastelli, S.; Salvetti, A.; Tognoni, E. New procedure for quantitative elemental analysis by laser-induced plasma spectroscopy. **Applied Spectroscopy**, v. *53*, n. 8, p. 960-964, 1999. DOI: http://doi.org/10.1366/0003702991947612.

CREMERS, D. A.; RADZIEMSKI, L. J. **Handbook of laser-induced breakdown spectroscopy**. Oxford, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2013.

KRAMIDA, A.; RALCHENKO, Y.; READER, J. **NIST Atomic Spectra Database (version 5.6.1)**. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2018. Disponível em: https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html. Acesso em: 30 set. 2024.

Villas-Boas, P. R.; Franco, M. A.; Martin-Neto, L.; Gollany, H. T.; Milori, D. M. B. P. Applications of laser-induced breakdown spectroscopy for soil analysis, part I: review of fundamentals and chemical and physical properties. **European Journal of Soil Science**, v. 71, n. 5, p. 789-804, 2019. DOI: http://doi.org/10.1111/ejss.12888.

Predição espacial do teor de matéria orgânica e argila do solo em vinhedos por espectroscopia Vis-NIR-SWIR

Spatial prediction of soil organic matter and clay content in vineyards by Vis-NIR-SWIR spectroscopy

Daniely Vaz da Silva-Sangoi[1], Jean Michel Moura-Bueno[2], Ricardo Simão Diniz Dalmolin[3], Luciano Gebler[4]

[1] *Doutorando, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria (RS), Brasil, danyvaz25@gmail.com*
[2] *Professor, Universidade de Cruz Alta, Cruz Alta (RS), Brasil, bueno.jean1@gmail.com*
[3] *Professor, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria (RS), Brasil, dalmolin@ufsm.br*
[4] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br*

RESUMO

Os teores de argila e de matéria orgânica do solo (MOS) são propriedades importantes que determinam a qualidade dele. Conhecer esses teores no solo está relacionado a uma série de processos de interesse agrícola e ambiental. Por isso, mapear detalhadamente essas propriedades em vinhedos é o ideal, porém pode demandar custos elevados com as amostragens e análises de solos. A análise de espectroscopia do solo (Vis-NIR-SWIR – 350-2.500 nm) aliada a análises laboratoriais convencionais pode ser uma estratégia para a redução desses custos, pois ela tem grande potencial na avaliação do teor de argila e MOS para uso na vitivinicultura de precisão. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de modelos de espectroscopia Vis-NIR-SWIR para predição espacial do teor de argila e MOS de solos em área de vitivinicultura. Isso foi realizado considerando um conjunto de dados de solo de uma pequena área vitivinícola de 3 ha no município de Muitos Capões, região sul do Brasil. Amostras de solo foram coletadas em 74 locais em duas profundidades (0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m), totalizando 148 amostras de solo. Nas amostras de solo foram realizadas a determinação do teor de argila e MOS e também leituras em espectroradiômetro na faixa Vis-NIR-SWIR. Os dados espectrais foram submetidos a três técnicas de pré-processamento (suavização – SMO, Savitzky-Golay com primeira derivada – SGD e Binning – BIN). Posteriormente, esses dados foram usados para treinar modelos espectrais. Na etapa de calibração, três aprendizados de máquina foram testados: cubista – CUB, floresta aleatória – RF e regressão por mínimos quadrados parciais – PLSR. A partir dos teores de argila e MOS determinados em laboratório (MOS pelo método de combustão por via úmida) e valores preditos pelos modelos de espectroscopia Vis-NIR-SWIR, foram gerados mapas da variação espacial desses atributos. Dentre os modelos de espectroscopia Vis-NIR-SWIR, o modelo RF com SGD apresentou o melhor desempenho por validação cruzada (cv) para argila, com $R^2cv = 0,95$ e RMSEcv = 1,06%, e o PLSR com SGD para MOS com $R^2cv = 0,98$ e RMSEcv = 0,07%. Os dados preditos pela espectroscopia Vis-NIRS-WIR preservaram a estrutura espacial dos dados obtidos pelos métodos convencionais. A modelagem de espectroscopia Vis-NIR-SWIR foi mais eficiente na predição da MOS, enquanto a interpolação espacial foi mais eficaz na predição da argila. Dados preditos por espectroscopia Vis-NIR-SWIR com menor acurácia aumentaram os erros das predições espaciais. A técnica de espectroscopia Vis-NIR-SWIR mostrou ter potencial para gerar mapas detalhados do teor argila e MOS para o uso na vitivinicultura de precisão.

Palavras-chave: espectroscopia Vis-NIR-SWIR; krigagem; teor de argila; matéria orgânica do solo; vitivinicultura de precisão.

ABSTRACT

Soil organic matter (SOM) and clay contents are important properties that determine soil quality. Knowing their contents in the soil is related to a series of processes of agricultural and environmental interest. Thus, mapping these properties in vineyards in detail is ideal but it can have high costs for sampling and soil analysis. An analysis

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000090

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

spectrum analysis (Vis-NIR-SWIR - 350-2500 nm) combined as an experimental method of choice can be a strategy to reduce these costs, as it has great potential to estimate clay and SOM content for precision viticulture.. Thus, the objective of this study was to evaluate the potential of Vis-NIR-SWIR spectroscopy models for spatial prediction of clay and SOM content of soils in a wine-growing area. This was carried out considering a soil dataset of a small winegrowing area of 3 ha in the municipality of Meus Capões, in the southern region of Brazil. Soil samples were collected at 74 sites at two depths (0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m) depth, totaling 148 soil samples. In the soil samples, the determination of clay and MOS content and spectroradiometer readings in the Vis-NIR-SWIR range were performed. Spectral data were subjected to three preprocessing techniques (smoothing - SMO; Savitzky-Golay with first derivative - SGD; Binning - BIN). Subsequently, these data were used to train spectral models. In the calibration stage, three machine learnings were tested: Cubist-CUB; Random Forest-RF; and Partial Least Squares Regression-PLSR. From the clay and MOS data determined in the laboratory (traditional wet chemistry) and predicted by the Vis-NIR-SWIR spectroscopy models, spatial prediction maps of these attributes were generated. Among the Vis-NIR-SWIR spectroscopy models, the RF + SGD model showed the best cross-validation performance for clay, with $R^2cv = 0.95$ and RMSEcv = 1.06%, and the PLSR + SGD for SOM, with $R^2cv = 0.98$ and RMSEcv = 0.07%. Data predicted by Vis-NIRS-WIR spectroscopy preserved the spatial structure of data obtained by traditional wet chemical analysis. Vis-NIR-SWIR spectroscopy modeling was more efficient in predicting SOM, while spatial interpolation was more efficient in predicting clay. Data predicted by Vis-NIR-SWIR spectroscopy with lower accuracy increased the errors of spatial predictions. The Vis-NIR-SWIR spectroscopy technique was shown to have the potential to generate detailed maps of clay and SOM content for precision viticulture.

Keywords: Vis-NIR-SWIR spectroscopy; kriging; clay content; soil organic matter; precision viticulture.

1 INTRODUÇÃO

A demanda por informações de solo tem crescido constantemente nos últimos anos, em especial sobre teores de argila e matéria orgânica do solo (MOS), por serem importantes nas questões ambientais em diferentes escalas, por serem parâmetros fundamentais de qualidade do solo (Global Soil Partnership, 2017) e de limitações para o uso agrícola dele (Mouazen; Al-Asadi, 2018). Na vitivinicultura, muitas características do mosto, como pH, acidez total e teor de açúcar, e do vinho, como teor alcoólico, acidez e cor, estão diretamente relacionadas às características do solo como MOS e teor de argila (Filippini et al., 2017). A produtividade e a qualidade do mosto são influenciadas pela adubação nitrogenada e fosfatada (Brunetto et al., 2019), cuja recomendação depende dos teores de argila e MOS. Técnicas de vitivinicultura de precisão (VP) (Matese; Di Gennaro, 2015) têm cada vez mais buscado representar espacialmente os teores dessas propriedades para direcionar esforço e capital e obter a máxima produtividade vitícola conforme a capacidade de sustentação do solo.

Assim, medidas ou estimativas confiáveis dos teores de argila e MOS são fundamentais para um manejo adequado do solo e na qualidade de cultivos nos vinhedos. Entretanto, o mapeamento de propriedades do solo, pode ser oneroso, uma vez que, as análises laboratoriais convencionais são caras e demoradas, utilizando processos de extração por reagentes químicos e quantificação que levam várias horas, retardando a disponibilidade da informação. Como consequência, a densidade amostral em VP normalmente acaba sendo limitada pelos custos das análises laboratoriais (Gruijter et al., 2006), afetando diretamente a qualidade do mapa final.

Adquirir informações suficientes para explicar a variabilidade do solo na paisagem sem aumentar o número de análises laboratoriais tradicionais ainda é um desafio. Alternativamente, a predição dessas propriedades pela técnica de espectroscopia na região do espectro eletromagnético do visível (Vis – 350-700 nm), infravermelho próximo (NIR – 700-1.100 nm) e infravermelho de ondas curtas (SWIR – 1.100-2.500 nm) pode ser uma solução mais rápida, com preparação de amostra mais fácil e sem extratores químicos (Wijewardane et al., 2016). A predição de propriedades do solo feita por espectroscopia Vis-NIR-SWIR é uma ferramenta com potencial que, juntamente com técnicas de predição espacial, fornece a base para o mapeamento em escala de campo de alta resolução (Lazaar et al., 2020) e pode ser uma excelente alternativa para uso na VP.

No Brasil ainda existe uma lacuna sobre a aplicabilidade de dados preditos via espectroscopia Vis-NIR-SWIR para a predição espacial por métodos geoestatísticos. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de modelos de espectroscopia Vis-NIR-SWIR para predição espacial do teor de argila e MOS de solos em área de vitivinicultura, avaliando seu potencial para uso dos dados em situação em que não há dados laboratoriais disponíveis.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no município de Muitos Capões, localizado na região nordeste do estado do

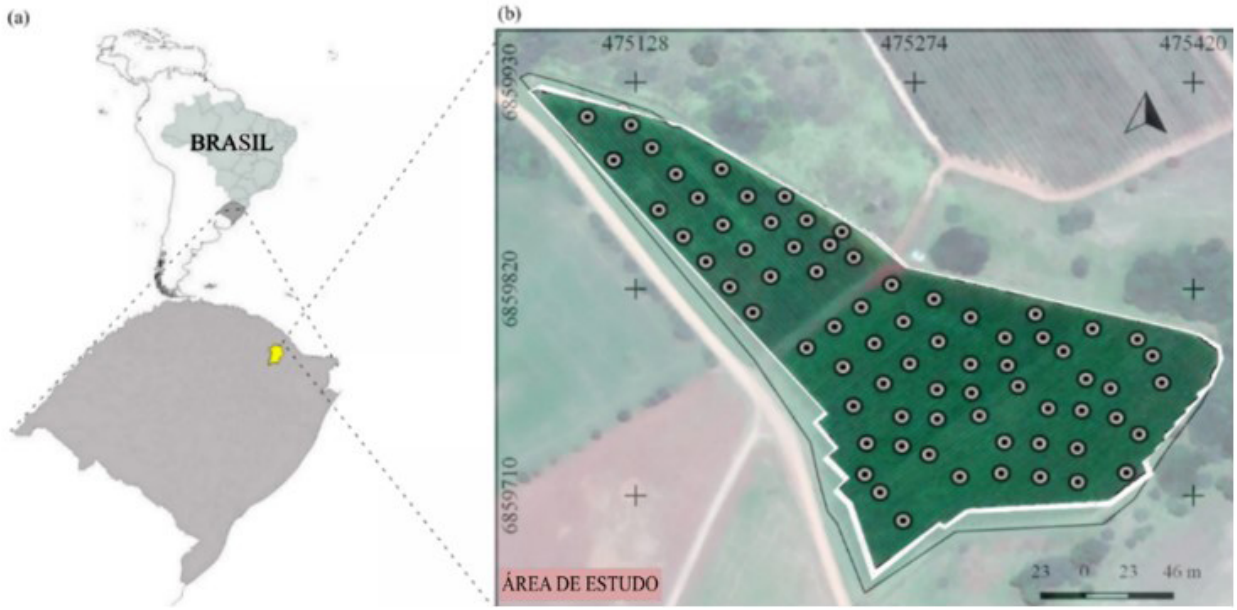


Figura 1. Localização da área de estudo no município de Muitos Capões, Rio Grande do Sul, Brasil, com identificação dos 74 pontos de coleta de solo.

Rio Grande do Sul (RS), Brasil, em uma área de 3 ha, cultivada com vinhedos de três cultivares, Pinot Chardonay e Cabernet Sauvignon (Figura 1a). A altitude média da área é 850 m e o relevo é suave ondulado. O clima é subtropical úmido (Cfb) sem período de estiagem definido (Alvares et al., 2013). A classe de solo predominante na área é Latossolo Vermelho distroférrico típico, derivados de rochas vulcânicas extrusivas ácidas.

A amostragem do solo foi realizada de forma sistemática por meio de uma grade amostral regular de 20 m x 20 m, obtendo-se 74 locais para amostragem (Figura 1b). Nesses pontos foram coletadas amostras deformadas de solo em duas profundidades (camada 1 = 0,00-0,20 m, camada 2 = 0,20-0,40 m). Essa estratificação vertical da amostragem de solo está de acordo com as recomendações para pomares de frutíferas no Brasil (Natale et al., 2020). Além disso, a variação nas propriedades físicas e químicas do solo tem efeito na produtividade da videira e qualidade do mosto (Bramley et al., 2011). Portanto, avaliar a variação vertical na paisagem dessas propriedades do solo é um dos princípios da VP (Matese; Di Gennaro, 2015).

Nas amostras de solos, após secas e moídas (2 mm), foram determinados os teores de carbono orgânico do solo (COS) e realizada a análise granulométrica. Para o COS realizou-se a extração por combustão úmida com solução sulfocrômica ($K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$), na presença de aquecimento externo e determinação por titulação com $Fe(NH_4)_2(SO_4)_26H_2O$ (Yeomans; Bremner, 1988). O teor de COS foi transformado para MOS por multiplicação pelo fator 1,724 (fator de Van Bemmelen) (van Bemmelen, 1890). A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, de acordo com metodologia preconizada pela Embrapa (Donagemma et al., 2017).

A refletância espectral de amostras de solo (secas em estufa a 45º C e peneiradas a 2 mm) foi obtida com o uso do espectroradiômetro FieldSpec 3, no intervalo de 350 a 2.500 nm com resolução espectral de 1 nm e 3 nm. Para realização da leitura foram utilizados aproximadamente 15 cm^3 de solo acondicionados em placa de petri. O equipamento de leitura foi conectado a um probe de contato que gera energia eletromagnética e minimiza interferências externas. Uma placa branca Spectralon (*barium sulfate plate*) foi utilizada como padrão de referência de 100% de reflectância para a calibração a cada 20 minutos de uso do espectrorradiômetro. Cinco medições independentes, com rotação de 72º cada, foram realizadas, para garantir total representação da área de superfície examinada. O espectro final foi calculado com um valor médio das cinco varreduras de espectro.

Foram aplicadas três técnicas de pré-processamento nas curvas de reflectância brutas (RAW): suavização (SMO), usando uma janela móvel de 9 nm; (SGD) 1ª derivada de Savitzky-Golay, usando polinômio de primeira ordem, com janela de busca de 11 nm (Savitzky; Golay, 1964); e Binning (BIN). Essas técnicas foram aplicadas com objetivo de remover a variabilidade física devido à dispersão da luz e enfatizar as características de interesse ao longo do espectro (Rinnan et al.,

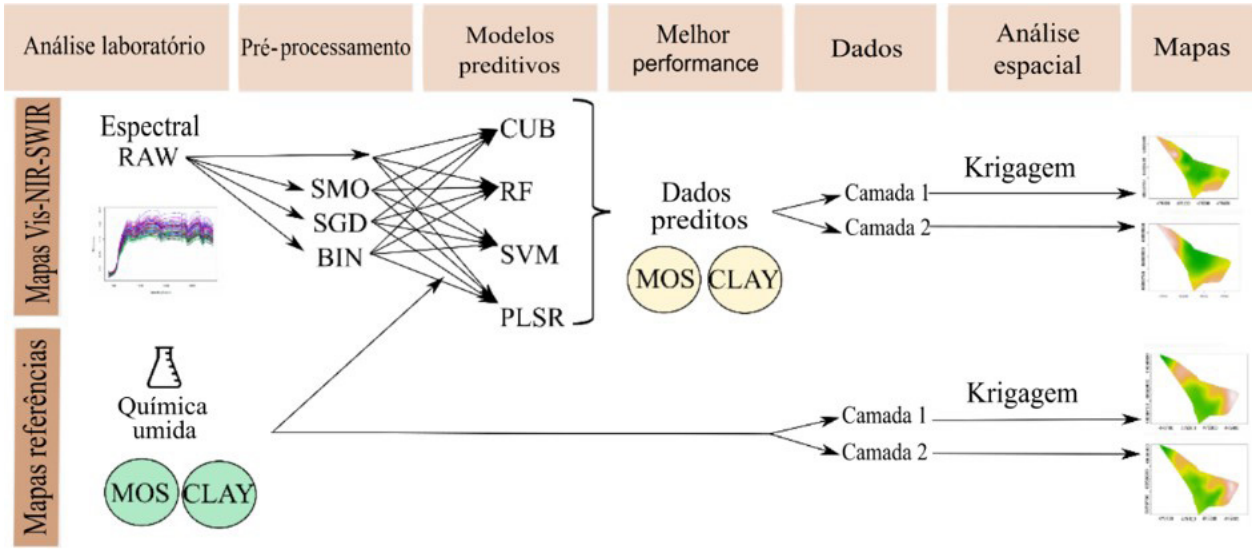


Figura 2. Fluxograma da metodologia. Dados analíticos de matéria orgânica do solo (MOS) e teor de argila (Clay) foram acoplados com dados espectrais brutos (RAW) e pré-processados por suavização (SMO); 1a derivada Savitzky-Golay (SGD); Binning (BIN) para calibrar modelos preditivos: cubist (CUB); floresta aleatória (RF); e regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR). Os dados previstos e os dados de referência foram usados para produzir os mapas.

2009). Os pré-processamentos foram realizados utilizando o pacote Prospectr (Stevens; Ramirez-Lopez, 2020) no software R (R Core Team, 2020).

Modelos espectrais foram calibrados utilizando três técnicas de aprendizado de máquina: cubista (CUB), floresta aleatória (RF) e regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR). Esses modelos foram calibrados usando os valores de MOS e argila como variáveis de resposta para cada dado de espectro bruto e pré-processado (RAW, SMO, SGD e BIN) como covariáveis. Isso resultou em 12 modelos ajustados para cada variável, conforme apresentado no fluxograma da metodologia (Figura 2).

Os valores de MOS e argila determinados pela análise de combustão via úmida e da pipeta, como aqueles preditos pelos modelos espectrais Vis-NIR-SWIR. foram utilizados para análise da variância espacial, considerando as camadas 1 e 2 separadamente. Essa etapa foi realizada para avaliar se os dados preditos por Vis-NIR-SWIR preservam a estrutura de correlação espacial dos dados de referência (métodos convencionais).

Para isso, um modelo teórico foi ajustado a cada semivariograma experimental considerando os parâmetros iniciais: alcance (*range*), variância explicada (*spill*) e efeito pepita (*nugget*). Posteriormente, os parâmetros foram estimados por meio do algoritmo da máxima verossimilhança restrita (REML) (Marchant; Lark, 2017). Os modelos ajustados foram usados para predizer as variáveis pelo método de krigagem ordinária (Webster; Oliver, 2007). Todas as etapas foram realizadas no ambiente R (R Core Team, 2020), utilizando o pacote "Georob" (Papritz; Schwierz, 2013)

Foram obtidos dois mapas de MOS e argila para cada camada: (i) mapas obtidos pelos teores quantificados pelos métodos convencionais, denominados de mapas de referência; e (ii) mapas obtidos pelos dados preditos por modelagem espectral Vis-NIR-SWIR, denominados mapas Vis-NIR-SWIR.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teor de argila nas amostras das duas camadas variou entre 53,90% e 73,20%, com média de 66,95%. A camada 1 apresentou teor de argila médio de 65,09% (sd = 3,56%) e amplitude de 18%, enquanto na camada 2 a média foi 68,81% (sd = 2,56%) e a amplitude, de 10%. O teor de MOS variou entre 3,12% e 5,71%, com média de 4,33% e sd de 0,46% nas amostras das duas camadas. Já para as camadas separadas, a amplitude de MOS foi sutilmente maior na camada 1, variando entre 3,78% e 5,71% (sd = 0,38%), enquanto na camada 2 os valores mínimos e máximos foram 3,12% e 4,83%, respectivamente (sd = 0,32%), ambas camadas com amplitude de 2%. Os valores médios de argila e MOS obtidos pelos modelos de espectroscopia Vis-NIR-SWIR foram próximos aos valores obtidos pelos métodos de referência de laboratório para ambas a camadas avaliadas. Em geral, observa-se diferença na amplitude do teor de argila dos valores preditos por Vis-NIR-SWIR comparado aos obtidos pelo método de referência de laboratório. Na camada 1, a amplitude passou de 17,7% para 10,4% e, na camada 2, de 10,4% para 13,9%, sendo observado subestimação na camada 1 e superestimação na camada 2.

O melhor desempenho nas predições do teor de argila foi alcançado pelo modelo RF com SGD, R^2 = 0,95; RMSE = 1,06% e RPIQ = 4,00. Já para o teor de MOS, as predições mais acuradas foram alcançadas pelo modelo PLSR com SGD, apresentando R^2 = 0,98; RMSE = 0,07% e RPIQ = 10,73. Quanto aos pré-processamentos, os modelos calibrados com espectros processados por SGD apresentaram a maior acurácia nas predições de MOS e argila (Tabela 1). Para a predição espacial, o modelo com melhor ajuste do semivariograma foi o exponencial para ambas propriedades do solo (Figuras 3 e 3). Para os dados de argila, houve mudança nos parâmetros *nugget* e *spill* entre os dados de argila de referência e preditos por Vis-NIR-SWIR para as camadas 1 e 2 (Figuras 3a, 3d, 3g, 3j). Enquanto o *nugget* aumentou, a variância explicada diminuiu (*psill*). Já o alcance foi semelhante entre os dados e camadas, sendo aproximadamente de 11 m.

Observou-se que quanto melhor o desempenho dos modelos de espectroscopia Vis-NIR-SWIR, mais preservada foi a estrutura de correlação espacial, consequentemente, maior a similaridade das predições espaciais entre dados Vis-NIR-SWIR e de referência. Esse comportamento foi observado para predição de argila e areia em campo agrícola no distrito de Karacabey, na província de Bursa, Turquia (Tümsavaş et al., 2019). Da mesma forma, para predição de carbono orgânico em solos agrícolas do sudeste da Czech Republic, Brodský et al. (2013) observaram que maiores incertezas associadas à modelagem espectral resultaram em maiores incertezas nas predições espaciais pelo algoritmo de krigagem. Os erros nas predições espaciais também são influenciados pelo tipo de sensor utilizado na obtenção dos dados espectrais de solo (Lazaar et al., 2020).

A espectroscopia Vis-NIR-SWIR combinada com a interpolação espacial, mostrou ser uma abordagem promissora para obtenção dos teores de argila e MOS em escala local, em comparação com as análises laboratoriais tradicionais, que demandam reagentes químicos e são demoradas. Assim, o uso combinado dessas técnicas pode contribuir na geração de informações para o manejo adequado do fornecimento de doses de nitrogênio e fósforo, uma vez que a produtividade das videiras e a qualidade do mosto são influenciadas por esses nutrientes (Brunetto et al., 2019; Stefanello et al., 2021). Por outro lado, pode ser útil como uma análise exploratória, em situações em que não há dados laboratoriais disponíveis, permitindo o adiantamento de avaliações e ações em viticultura de precisão até haver a disponibilização e a conformação dos dados através dos métodos laboratoriais tradicionais, conforme Santos et al. (2022).

Portanto, a espectroscopia Vis-NIR-SWIR apresenta-se como uma ferramenta promissora na VP, na busca de maior rentabilidade e menor impacto ambiental na obtenção de informações para o manejo do solo. De

Tabela 1. Estatística da validação cruzada dos modelos espectrais dos modelos de predição Vis-NIR para o conteúdo de argila e MOS ajustados para as 148 amostras.

Mod.	Proc.	Argila %			MOS %		
		R^2	RMSE %	RPIQ	R^2	RMSE %	RPIQ
CUB	RAW	0,53	2,54	1,94	0,81	0,21	3,48
RF	RAW	0,95	1,34	3,69	0,92	0,16	4,57
PLSR	RAW	0,37	2,85	1,73	0,7	0,25	2,82
CUB	SMO	0,71	1,98	2,48	0,86	0,18	4,01
RF	SMO	0,93	1,36	3,62	0,92	0,16	4,59
PLSR	SMO	0,15	3,32	1,48	0,34	0,37	1,91
CUB	SGD	0,55	2,41	2,04	0,74	0,25	2,89
RF	**SGD**	**0,95**	**1,06**	**4,00**	0,95	0,13	5,67
PLSR	**SGD**	0,2	3,22	1,53	**0,98**	**0,07**	**10,73**
CUB	BIN	0,47	2,63	1,87	0,8	0,21	3,39
RF	BIN	0,95	1,25	3,95	0,93	0,15	4,71
PLSR	BIN	0,04	3,53	1,4	0,25	0,4	1,8

Mod.: modelos espectrais; Proc.: pré-processamentos; MOS: matéria orgânica do solo; CUB: modelo cubist; RF: modelo floresta aleatória; PLSR: modelo regressão por mínimos quadrados parciais; RAW: dados brutos, sem pré-processamento; SMO: Smooting; SGD: Savitz-Golay; BIN: Binning; R^2: coeficiente de determinação; RMSE: raiz quadrada do erro médio; RPIQ: proporção de desempenho no intervalo interquartil.

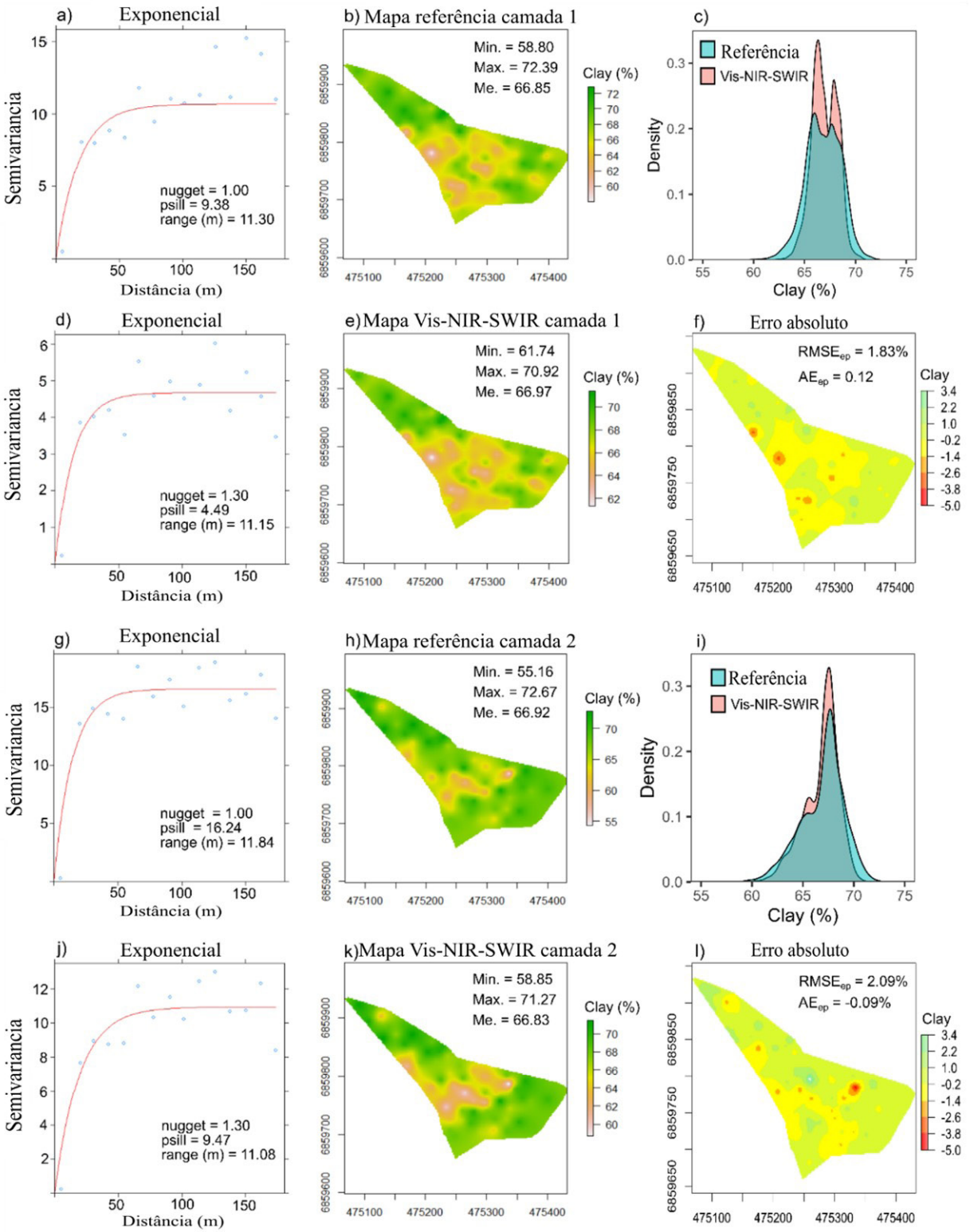


Figura 3. Semivariogramas, predição espacial dos valores de referência e preditos por Vis-NIR-SWIR, distribuição de frequência dos valores preditos e mapa do erro absoluto (diferença em termos absolutos entre mapa de referência e mapa Vis-NIR-SWIR) para o teor de argila (Clay) nas camadas 1 e 2.

acordo com Lopo et al. (2018), técnicas espectroscópicas podem ser utilizadas para uma gestão mais precisa e sustentável dos vinhedos, monitorando mudanças na composição do solo bem como para uma estimativa rápida de propriedades químicas do solo, melhorando a eficiência no uso de recursos e definindo estratégias para melhor manejo do pomar. Além disso, é possível obter dados precisos e com menor custo,

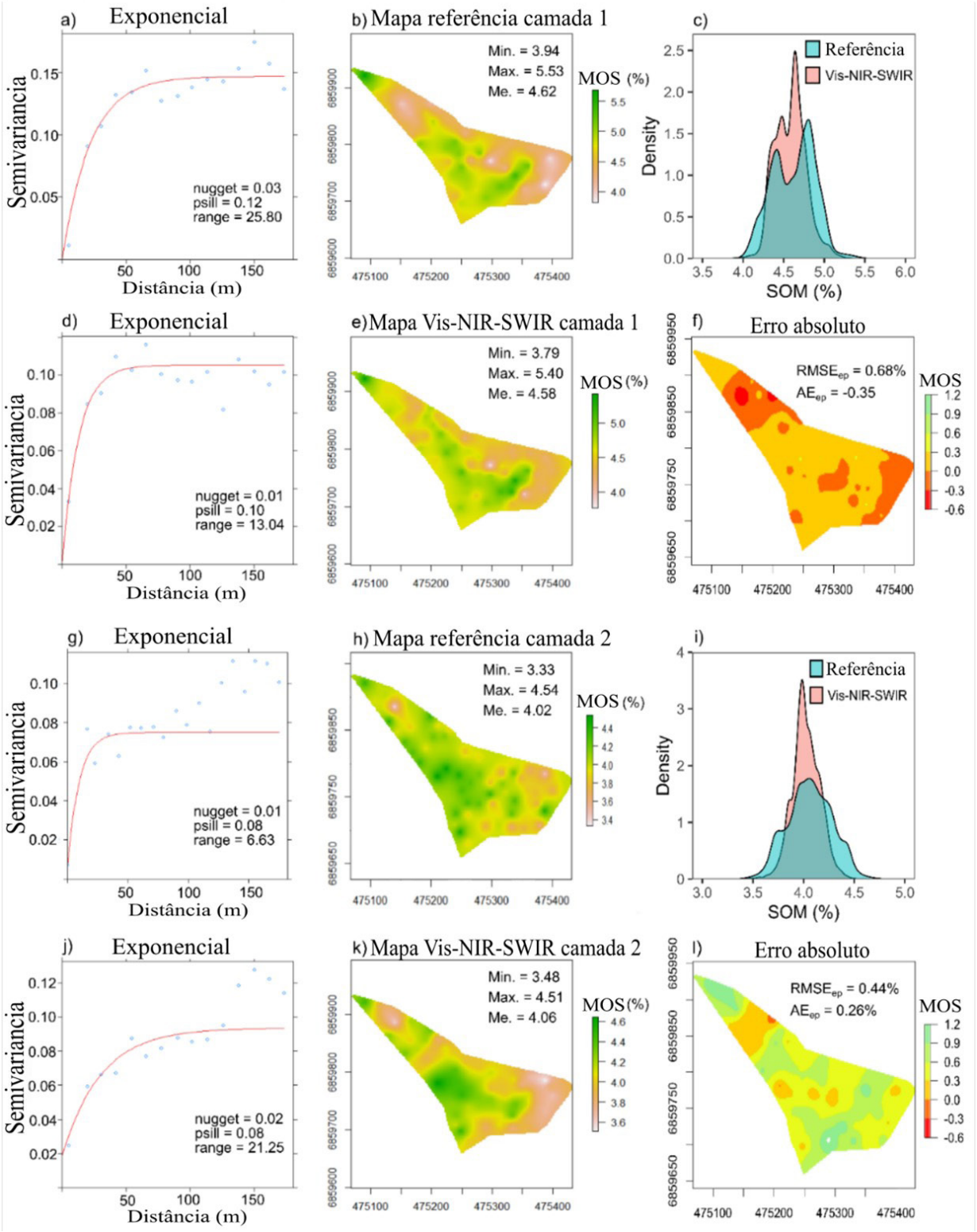


Figura 4. Semivariogramas, predição espacial dos valores de referência e preditos por Vis-NIR-SWIR, distribuição de frequência dos valores preditos e mapa do erro absoluto (diferença em termos absolutos entre mapa de referência e mapa Vis-NIR-SWIR) para o teor de MOS nas camadas 1 e 2.

considerando o investimento de longo prazo, a fim de subsidiar o direcionamento de recursos visando gerar informações de propriedades do solo importantes para auxiliar na Denominação de Origem – "terroir" dos vinhos (Van Leeuwen et al., 2010; Fraga et al., 2017).

4 CONCLUSÕES

A técnica da espectroscopia Vis-NIR-SWIR combinada com o método de krigagem foi eficiente para predizer espacialmente o teor de MOS e argila em solos sob videiras no sul do Brasil.

Os dados preditos Vis-NIR-SWIR preservam a estrutura espacial dos dados de MOS e argila obtidos pela análise química úmida tradicional.

Os mapas gerados com os teores de argila e MOS preditos pela espectroscopia Vis-NIR-SWIR apresentaram boa acurácia quando comparados aos mapas obtidos com dados de referência (química úmida de laboratório).

A técnica de espectroscopia Vis-NIR-SWIR mostrou ter potencial para gerar mapas detalhados do teor argila e MOS para uso na vitivinicultura de precisão.

Essa técnica tem potencial de uso em trabalhos exploratórios enquanto dados laboratoriais não estão disponíveis, dando as bases iniciais mínimas para tomada de decisão.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; de MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. K¨oppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507.

BRAMLEY, R. G. V.; OUZMAN, J.; BOSS, P. K. Variation in vine vigour, grape yield and vineyard soils and topography as indicators of variation in the chemical composition of grapes, wine and wine sensory attributes. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. *17*, n. 2, p. 217-229, 2011. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00136.x.

BRODSKÝ, L.; VAŠÁT, R.; KLEMENT, A.; ZÁDOROVÁ, T.; JAKŠÍK, O. Uncertainty propagation in VNIR reflectance spectroscopy soil organic carbon mapping. **Geoderma**, v. *199*, p. 54-63, 2013. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.006.

BRUNETTO, G.; ROSA, D. J.; AMBROSINI, V. G.; HEINZEN, J.; FERREIRA, P. A. A.; CERETTA, C. A.; SOARES, C. R. F. S.; MELO, G. W. B.; SORIANI, H. H.; NICOLOSO, F. T.; FARIAS, J. G.; DE CONTI, L.; SILVA, L. O. S.; SANTANA, N.; COUTO, R. R.; JACQUES, R. J. S.; TIECHER, T. L. Use of phosphorus fertilization and mycorrhization as strategies for reducing copper toxicity in young grapevines. **Scientia Horticulturae**, v. *248*, p. 176-183, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.026.

DONAGEMMA, G. K.; VIANA, J. H. M.; ALMEIDA, B. G.; RUIZ, H. A.; KLEIN, V. A.; DECHEN, S. C. F.; FERNANDES, R. B. A. Análise granulométrica. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 95-116.

FILIPPINI, A.; FLORES, J. M.; MIELE, A. Geotechnologies and soil mapping for delimitation of management zones as an approach to precision viticulture. **Applied and Environmental Soil Science**, v. *2017*, p. 4180965, 2017. DOI: http://doi.org/10.1155/2017/4180965.

FRAGA, H.; COSTA, R.; SANTOS, J. A. Multivariate clustering of viticultural terroirs in the Douro winemaking region. **Ciência e Técnica Vitivinícola**, v. *32*, n. 2, p. 142-153, 2017. DOI: http://doi.org/10.1051/ctv/20173202142.

GLOBAL SOIL PARTNERSHIP. **Report of the Fifth Meeting of the Plenary Assembly (PA) of the Global Soil Partnership - GSP**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017. Disponível em: http://www.fao.org/3/a-bs973e.pdf. Acesso em: 22 out. 2023.

GRUIJTER, J. J.; BIERKENS, M. F. P.; BRUS, D. J.; KNOTTERS, M. **Sampling for natural resource monitoring**. Berlin: Springer, 2006. DOI: http://doi.org/10.1007/3-540-33161-1.

LAZAAR, A.; MOUAZEN, A. M.; EL HAMMOUTI, K.; FULLEN, M.; PRADHAN, B.; MEMON, M. S.; ANDICH, K.; MONIR, A. The application of proximal visible and near-infrared spectroscopy to estimate soil organic matter on the Triffa Plain of Morocco. **International Soil and Water Conservation Research**, v. *8*, n. 2, p. 195-204, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.04.005.

LOPO, M.; TEIXEIRA DOS SANTOS, C. A.; PÁSCOA, R. N. M. J.; GRAÇA, A. R.; LOPES, J. A. Near infrared spectroscopy as a tool for intensive mapping of vineyards soil. **Precision Agriculture**, v. *19*, n. 3, p. 445-462, 2018. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-017-9529-2.

MARCHANT, B. P.; LARK, R. M. The Matern variogram model: implications for uncertainty propagation and sampling in geostatistical surveys. **Geoderma**, v. *140*, n. 4, p. 337-345, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.04.016.

MATESE, A.; DI GENNARO, S. F. Technology in precision viticulture: a state of the art review. **International Journal of Wine Research**, v. *7*, p. 69-81, 2015. DOI: http://doi.org/10.2147/IJWR.S69405.

MOUAZEN, A. M.; AL-ASADI, R. A. Influence of soil moisture content on assessment of bulk density with combined frequency domain reflectometry and visible and near infrared spectroscopy under semi field conditions. **Soil & Tillage Research**, v. *176*, p. 95-103, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2017.11.002.

NATALE, W.; BRUNETTO, G.; ROZANE, D. E.; MELO, G. W. B.; CORRÊA, M. D. M.; LIMA NETO, A. J. Amostragem e preparo de amostras de solo e folhas em frutíferas. In: BRUNETTO, G. (ed.). **Atualização sobre calagem e adubação em frutíferas**. *Viçosa: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 2020. p. 32-44.

PAPRITZ, A.; SCHWIERZ, C. Georob: robust geostatistical analysis of spatial data. In: R PACKAGE (org.). **Version 0.1-0**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2013. DOI: http://doi.org/10.32614/CRAN.package.georob.

R CORE TEAM. **R:** A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2020. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 22 out. 2023.

RINNAN, Å.; BERG, F.; ENGELSEN, S. B. Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. **Trends in Analytical Chemistry**, v. *28*, n. 10, p. 1201-1222, 2009. DOI: http://doi.org/10.1016/j.trac.2009.07.007.

SANTOS, M. S.; GEBLER, L.; SEBEM, E. Correlation between vegetation indexes generated at Vitis Vinifera L. and soil, plant and production parameters for emergency application in decision making. **Ciência Rural**, v. *52*, n. 2, p. e20201037-e11, 2022. DOI: http://doi.org/10.1590/0103--8478cr20201037.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical Chemistry**, v. *36*, n. 8, p. 1627-1639, 1964. DOI: http://doi.org/10.1021/ac60214a047.

STEFANELLO, L. O.; SCHWALBERT, R.; SCHWALBERT, R. A.; DRESCHER, G. L.; DE CONTI, L., POTT, L. P.; TASSINARI, A.; KULMANN, M. S. S.; SILVA, I. C. B.; BRUNETTO, G. Ideal nitrogen concentration in leaves for the production of highquality grapes cv 'Alicante Bouschet' (Vitis vinifera L.) subjected to modes of application and nitrogen doses. **European Journal of Agronomy**, v. *123*, p. 126200, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126200.

STEVENS, A.; RAMIREZ-LOPEZ, L. An introduction to the prospectr package. In: R PACKAGE VIGNETTE (org). **Report N.:** R Package Version 0.1. 2014. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2020.

TÜMSAVAŞ, Z.; TEKIN, Y.; ULUSOY, Y.; MOUAZEN, A. M. Prediction and mapping of soil clay and sand contents using visible and near-infrared spectroscopy. **Biosystems Engineering**, v. *177*, p. 90-100, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.06.008.

VAN BEMMELEN, J. M. Über die Bestimmung des Wassers, des Humus, des Schwefels,der in den colloïdalen Silikaten gebundenen Kieselsäure, des Mangans u. s. w. im Ackerboden. **Die Landwirthschaftlichen Versuchs-Stationen**, v. 37, p. 279-290, 1890.

VAN LEEUWEN, C.; ROBY, J. P.; PERNET, D.; BOIS, B. Metodologia de zoneamento baseado no solo para terroirs vitícolas. **Bulletin de l'OIV**, v. *83*, n. 947, p. 13, 2010.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. DOI: http://doi.org/10.1002/9780470517277.

WIJEWARDANE, N. K.; GE, Y.; WILLS, S.; LOECKE, T. Prediction of soil carbon in the conterminous United States: visible and near infrared reflectance spectroscopy analysis of the rapid carbon assessment project. **Soil Science Society of America Journal**, v. *80*, n. 4, p. 973-982, 2016. DOI: http://doi.org/10.2136/sssaj2016.02.0052.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988. DOI: https://doi.org/10.1080/00103628809368027.

25

Uso da espectroscopia de infravermelho próximo para estimar o teor de nitrogênio foliar na cultura do milho

Infrared spectroscopy as an alternative technological tool for estimating nitrogen contents in corn crop

Diego Lima Lucchesi[1], Gabriela Naibo[2], Alexandre Alan Cassinelli[3], Gabriel Augusto Engel[4], André Luis Vian[5], Christian Bredemeier[6], Tales Tiecher[7]

[1] *Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), Brasil, diegolimalucc@gmail.com*

[2] *Doutoranda, Programa de Ciência do Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), Brasil, naibogabriela@gmail.com*

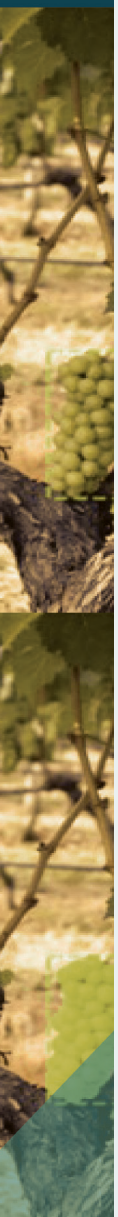
[3] *Acadêmico, Curso de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), Brasil, alexandrealanc@gmail.com*

[4] *Acadêmico, Curso de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), Brasil, gabrielengel99@hotmail.com*

[5] *Professor, Departamento de Plantas de Lavoura, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), Brasil, andre.vian@ufrgs.br*

[6] *Professor, Departamento de Plantas de Lavoura, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), Brasil, bredemeier@ufrgs.br*

[7] *Professor, Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), Brasil, tales.tiecher@ufrgs.br*



RESUMO

Os métodos químicos tradicionalmente empregados para a estimativa do teor de nitrogênio (N) em tecido foliar apresentam elevado custo, além de serem operacionalmente onerosos e com demanda de reagentes químicos. A espectroscopia de infravermelho próximo é um método alternativo que possibilita uma análise com menos custos e com geração mínima de resíduos tóxicos. O objetivo foi estimar os teores de nitrogênio (N) em tecido foliar de milho a partir da análise espectral na faixa do infravermelho próximo (780 a 2.500 nm), utilizando diferentes combinações de técnicas de pré-processamento e calibração multivariada. Foram utilizadas 326 amostras de tecido foliar de milho submetido a diferentes doses de adubação nitrogenada (0, 25, 50, 75, 100, 120, 150 e 200 kg ha^{-1} de N) coletadas antes do estádio de desenvolvimento vegetativo da cultura (V8). O teor de N nas amostras de tecido foi estimado por digestão sulfúrica seguida de quantificação pelo método semimicro Kjeldahl. Os pré-processamentos espectrais testados foram: *Detrend* – DET, *Standard Normal Variate* – SNV e *Savitzky-Golay Derivative* – SGD. Os métodos de calibração multivariada testados foram: *Partial Least Squares Regression* – PLSR e *Support Vector Machine* – SVM. A calibração do modelo foi feita por meio da validação cruzada por meio de uma divisão aleatória em segmentos a partir de 326 amostras. O teor de N no tecido foliar de milho variou de 3,6 a 45,3 g kg^{-1}, com teor médio de 18,4 g kg^{-1} e desvio padrão de 8,3 g kg^{-1}. Os valores preditos de N por espectroscopia foram comparados aos valores mensurados pelo método químico, sendo a acurácia da espectroscopia para este fim avaliada através dos seguintes parâmetros estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), relação entre o desempenho e a distância interquartil (RPIQ) e o erro médio quadrático de predição (RMSE). O uso da técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) foi capaz de predizer com acurácia e precisão os teores de nitrogênio em tecido foliar de milho, sendo uma alternativa para maior celeridade nas análises de tecido. Os melhores resultados foram encontrados para os modelos de calibração *Support Vector Machine* – SVM e pré-processamento *Savitzky-Golay Derivative* – SGD.

Palavras-chave: infravermelho próximo; predição de nitrogênio; pré-processamento espectral; tecido vegetal.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000008

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

ABSTRACT
The traditional methods used to estimate the nutrient content in plant materials and grains are expensive, operationally onerous and require chemical reagents. The near infrared spectroscopy is a new method that allows a more efficient analysis, with less costs and no toxic residues. The objective was to estimate nitrogen (N) contents in corn leaf tissue using different combinations of preprocessing techniques and multivariate calibration. A total of 326 corn samples were used to obtain a prediction model using the Detrend (DET), Standard Normal Variate (SNV) and Savitzky-Golay (SGD) preprocessing. The prediction models were developed from the Partial Least Squares Regression (PLSR) and Support Vector Machine (SVM) multivariate calibration methods. Model calibration was performed by cross-validation through a random segment split. The predicted N values through spectroscopy were compared to the values measured by the chemical method, and the accuracy of spectroscopy for this purpose was evaluated through the following statistical parameters: coefficient of determination (R2), ratio of performance to interquartile distance (RPIQ), and root mean square error of prediction (RMSE). The use of NIR spectroscopy predicted with accuracy and precision the N concentrations in corn plant tissue, being the best calibration models the Support Vector Machine (SVM) and preprocessing Savitzky-Golay Derivative (SGD).

Keywords: near infrared spectroscopy; nitrogen prediction; spectral pre-processing; plant tissue.

1 INTRODUÇÃO

A análise de tecidos ou materiais vegetais é empregada para quantificar o estado nutricional de plantas em relação aos macronutrientes e micronutrientes. Os tecidos foliares quimicamente analisados objetivando efetuar uma diagnose do estado nutricional das plantas devem seguir critérios uniformes durante a coleta, tratamento e análise das amostras. Diferentes metodologias podem ser empregadas para avaliar o estado nutricional das culturas. Por um lado, os métodos fornecem a quantidade exata de nutrientes presentes na amostra foliar por meio de análise química. Já os métodos de estimativa fornecem um valor aproximado dos teores de nutrientes presentes na amostra com uso de modelos calibrados (Prananto; Minasny; Weaver; 2020).

Os métodos tradicionais para quantificação dos teores de nutrientes em plantas utilizam a análise química do tecido vegetal, de modo a permitir um melhor diagnóstico e práticas de manejo para as culturas agrícolas (Embrapa, 2021). Essas análises são feitas inicialmente por meio de uma correta amostragem dos tecidos vegetais com posterior secagem em estufa e moagem de forma homogênea. Essas amostras são submetidas a uma digestão total, solubilizando os elementos presentes nos tecidos. Para quantificar os teores nutricionais de nitrogênio em amostras vegetais, normalmente é utilizado o método Kjeldahl. Inicialmente a matéria orgânica da amostra é oxidada durante a etapa de digestão com o uso de ácido sulfúrico e catalisadores em bloco digestor. Posteriormente, na etapa de determinação, o ácido sulfúrico e catalisadores transformam as proteínas e aminoácidos do tecido vegetal em $N\text{-}NH_4^+$, no qual é destilado e complexado em ácido bórico com indicador misto, com posterior titulação em solução padronizada de ácido sulfúrico (H_2SO_4) diluído (Tedesco et al., 1995).

A espectroscopia de infravermelho próximo (*Near Infrared Spectroscopy* – NIR é uma alternativa aos métodos analíticos tradicionalmente utilizados para estimativa dos teores nutricionais em tecidos vegetais, apresentando maior rapidez, com alta precisão e com redução dos custos (Van Maarschalkerweerd; Husted, 2015). A espectroscopia de infravermelho próximo vem sendo empregada na agricultura desde a década de 1990, utilizada para a estimativa dos atributos físico-químicos do solo e de outras análises agronômicas rotineiras (Demattê et al., 2019). As novas metodologias que utilizam a espectroscopia NIR têm apresentado alta eficiência para essas análises laboratoriais, demonstrando potencial para substituição dos métodos laboratoriais tradicionalmente empregados em diversos setores, sejam eles alimentícios, agrícolas, farmacêuticos, entre outros (Pasquini, 2003).

A espectroscopia NIR baseia-se no princípio da reflectância da radiação eletromagnética, no qual a partir da incidência de radiação na amostra é obtida uma quantidade de energia suficiente para vibrar as ligações químicas que unem os átomos de determinados compostos (Ferreira, 2017). O resultado dessa avaliação pode ser matematicamente convertido nos teores de nutrientes a serem determinados (Neto, 2005). Visando diminuir os erros nos espectros brutos que causam ruídos, faz-se necessário o emprego de análises de pré-processamentos previamente à análise multivariada. Para que essa técnica apresente boa acurácia e precisão é necessário construir um modelo de calibração multivariada em cada característica de interesse, associando os dados obtidos nas análises espectroscópicas NIR com os dados analíticos oriun-

dos dos métodos de referência. A realização de ajustes no modelo de calibração é feita por meio de procedimentos matemáticos e quimiométricos, juntamente ao modelo multivariado escolhido para as amostras.

Nas últimas décadas de pesquisa, os métodos baseados em espectroscopia de reflectância difusa vêm sendo empregados para estimar a concentração química em solos e sedimentos. Em 1979, surgiram os primeiros estudos responsáveis por estimar com sucesso as concentrações dos nutrientes N, P, K, Ca e B em espécies gramíneas (Shenk et al., 1979). Durante a década de 1980 as pesquisas com uso da espectroscopia se concentraram em estimar o teor de proteína em grãos e em forragens (Prananto et al., 2020). Em 1991, o primeiro modelo para estimativa de N em arroz foi desenvolvido, visando a otimização das estratégias de aplicação de fertilizantes (Batten; Blakeney, 1991).

Recentemente, as pesquisas relacionadas ao uso da espectroscopia de NIR em tecidos vegetais têm aumentado, no entanto ainda são escassas quando comparadas às pesquisas relacionadas ao uso dessa ferramenta em atributos do solo (Prananto et al., 2020). O uso da espectroscopia para estimativa dos teores nutricionais em tecidos vegetais ainda é pouco estudado, visto que as funções nutricionais e os compostos químicos vegetais apresentam grande complexidade, de modo a tornar a estimativa dos teores nutricionais em tecido foliar através da reflectância um processo dificultoso em relação à autocorrelação e colinearidade (Rodrigues et al., 2020). Santos et al. (2010) encontraram uma correlação positiva entre as metodologias utilizadas para a determinação de N-total com um $R^2 = 0,87$. Já Santos (2011) encontrou uma correlação positiva de $R^2 = 0,78$ e 0,89 para os valores de N no tecido das culturas de milho e soja, respectivamente.

As técnicas de análise nos tecidos foliares são de fundamental importância para que as práticas de manejo preconizadas pela agricultura de precisão possam ser realizadas em tempo hábil. Nesse sentido, há uma demanda para crescente por metodologias ágeis de análise de nutrientes foliares para que os potenciais produtivos das lavouras possam ser maximizados e potencializados durante a fase vegetativa das culturas.

Sendo assim, o trabalho tem por objetivo estimar as concentrações de nitrogênio em amostras de tecido vegetal de milho por meio da espectroscopia de infravermelho próximo e de diferentes combinações de pré-processamentos e métodos de calibração multivariada.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de tecidos vegetais de milho foram coletadas em experimentos conduzidos no município de Eldorado do Sul/RS, na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), durante os anos de 2015 a 2019. Foram coletadas no total 326 amostras de tecidos vegetais, visando obter um modelo de predição com alta acurácia e precisão.

O local em que os experimentos foram conduzidos pode ser caracterizado com Argissolo Vermelho distrófico típico (Streck et al., 2008). O clima é classificado como subtropical, com inverno seco e verão úmido (Cfa), conforme classificação climática de Koppen (Bergamaschi et al., 2003). Os manejos realizados nos tratamentos tiveram por objetivo gerar variabilidade nas concentrações de N nos tecidos vegetais por meio de doses de adubação nitrogenada, sendo: 0, 25, 50, 75, 100, 120, 150 e 200 kg ha^{-1} de N na forma de ureia aplicada no estádio V8 (oito folhas completamente desenvolvidas). As coletas do tecido foliar foram feitas antes do estádio de desenvolvimento vegetativo da cultura (V8). As amostras vegetais foram secadas em estufa com circulação de ar forçado, a uma temperatura de 65-70 °C, e moídas a uma fração de até 2,5 mm.

As análises químicas (metodologia tradicional) para quantificação do teor de N nas amostras foram feitas no Laboratório de Fisiologia Vegetal do Departamento de Plantas de Lavoura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com a solubilização sulfúrica seguida do método semimicro Kjeldahl (Tedesco et al., 1995). Já as análises espectroscópicas (metodologia proposta) foram feitas no Laboratório Federal de Defesa Agropecuária (Lanagro-RS) do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), no município de Porto Alegre/RS. O equipamento utilizado foi o espectrômetro modelo NIR, Bruker MPA (Waltham, Massachusetts, EUA), de modo a caracterizar a assinatura espectral das amostras de tecidos vegetais a uma faixa de 780 a 2.500 nm do espectro eletromagnético. O espectrômetro foi calibrado no modo de reflectância difusa com uma resolução espectral de 2 cm^{-1} e 60 leituras por espectro.

Após a leitura espectral das amostras dos tecidos vegetais do milho, os dados foram submetidos aos pré-processamentos *Detrend* – DET, *Standard Normal Variate* – SNV e *Savitzky-Golay Derivative* – SGD, possibilitando uma melhor predição da concentração de nitrogênio nas amostras. Por fim, foram desenvolvidos os modelos de predição por meio dos métodos de calibração multivariada *Partial Least Squares Regression* – PLSR e *Support Vector Machine* – SVM. A calibração do modelo foi feita com uso de validação cruzada por meio de uma divisão aleatória em segmentos.

Por fim, para verificar a acurácia da espectroscopia NIR para quantificação de N em tecido vegetal,

os valores encontrados nos métodos de predição foram comparados aos valores de referência encontrados nas análises laboratoriais por meio dos seguintes parâmetros de acurácia: coeficiente de correlação (R^2), relação entre o desempenho e a distância interquartil (RPIQ) e o erro médio quadrático de predição (RMSE). Conforme Veum et al. (2015), valores de coeficiente de correlação (R^2) superiores a 0,75 podem ser classificados como "satisfatórios", valores entre 0,50 e 0,75 "moderadamente satisfatórios" e inferiores a 0,50 "insatisfatórios". Valores para a relação entre o desempenho e a distância interquartil (RPIQ) superiores a 3 são considerados como "satisfatórios", entre 1,50 e 1,90 como "moderadamente satisfatórios" e inferiores a 1,50 como "insatisfatórios". O erro médio quadrático de predição (RMSE) mensura a acurácia da estimativa, sendo que valores mais próximos a zero indicam maior exatidão (Prananto et al., 2020). Todas as análises estatísticas foram realizadas com o uso do software R (R Core Team, 2021).

3 RESULTADOS

Na análise da estatística descritiva, observa-se que os teores de N no tecido foram valores máximo de 4,53% e mínimo de 0,36%, uma amplitude de 4,17, indicando uma alta variabilidade entre as amostras utilizadas no banco de dados (Tabela 1).

O desempenho das predições dos teores de N nos tecidos de milho, juntamente com os valores do coeficiente de determinação (R^2) obtidos pela análise estatística, pode ser observado na Tabela 2. O método de calibração multivariada *Support Vector Machine* – SVM apresentou os melhores resultados, obtendo valores de R^2 de 0,99 para todas as análises de pré-processamento (Figura 1A). Em contrapartida, o método *Partial Least Squares Regression* – PLSR alcançou valores de coeficiente de determinação (R^2) de 0,86 para o pré-processamento original, R^2 = 0,87 para *Detrend*, R^2 = 0,86 para *Standard Normal Variate* – SNV e R^2 = 0,90 para *Savitzky-Golay Derivative* – SGD.

Os maiores erros médios quadráticos de predição (RMSE) foram verificados nos modelos em que foi utilizado o método *Partial Least Squares Regression* – PLSR, entre 0,26 e 0,31, e, nesse método, o pré-processamento que mais reduziu o RMSE foi o *Savitzky-Golay Derivative* – SGD. Em contrapartida, o método de calibração multivariada *Support Vector Machine* – SVM não apresentou diferença entre os valores de erro médio quadrático de predição (RMSE) entre os distintos pré-processamentos avaliados (Tabela 1). Apesar disso, esse método se mostrou mais adequado para estimativa das concentrações de nutrientes em tecido vegetal com espectroscopia NIR em função de apresentar valores de RMSE.

Observa-se uma maior acurácia para estimativa das concentrações de nutrientes em tecido vegetal com espectroscopia NIR pelo uso do modelo *Support Vector Machine* – SVM em comparativo ao uso do método de calibração *Partial Least Squares Regression* – PLSR (Figura 1B).

Conforme classificação de Veum et al. (2015), todos os valores de coeficiente de determinação (R^2) obtidos nas análises podem ser considerados satisfatórios. Resultados semelhantes foram encontrados no estudo de Yarce e Rojas (2012), no qual buscou desenvolver uma metodologia para quantificação de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) e micronutrientes (Cu, Zn, Mn, Fe) em folhas de cana-de-açúcar utilizando a

Tabela 1. Estatística descritiva do conjunto de amostras de tecido utilizado no estudo.

Análise estatística	N no tecido
Mínimo	0,36
Máximo	4,53
Média	1,84
Mediana	1,75
Desvio Padrão	0,83
1st Qd	1,16
3st Qd	2,43

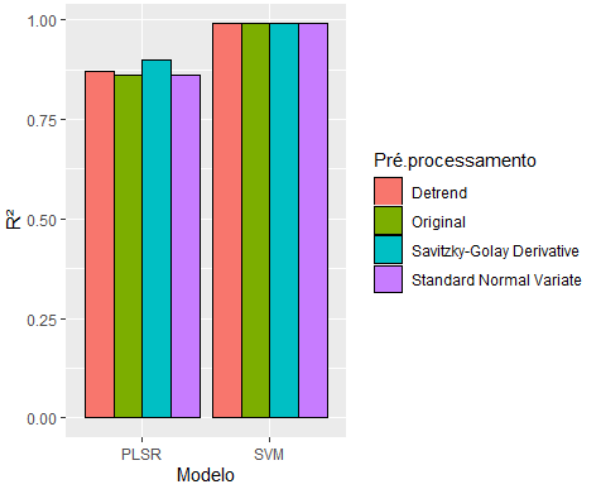


Figura 1. Comparativo dos valores do coeficiente de correlação (R^2) dos pré-processamentos utilizados entre os métodos de calibração multivariada *Partial Least Squares Regression* – PLSR e *Support Vector Machine* – SVM.

Tabela 2. Desempenho das predições de nitrogênio (N) em tecido foliar de milho por meio da espectroscopia NIR com o uso de diferentes métodos de calibração multivariada e pré-processamentos.

Modelo	Pré-processamento	R^2	RMSE	RPIQ	BIAS
PLSR	Original	0,86	0,31	4,1	0
PLSR	*Detrend*	0,87	0,30	4,2	0
PLSR	*Standard Normal Variate*	0,86	0,31	4,1	0
PLSR	*Savitzky-Golay Derivative*	0,90	0,26	4,9	0
SVM	Original	0,99	0,08	16,4	0
SVM	*Detrend*	0,99	0,08	16,7	0
SVM	*Standard Normal Variate*	0,99	0,08	16,7	0
SVM	*Savitzky-Golay Derivative*	0,99	0,08	16,7	0,01

espectroscopia NIR, obtendo coeficientes de determinação R^2 semelhantes, especialmente quando se compara o N, que alcançou um R^2 de 0,98. Os resultados obtidos por Prananto et al. (2021) demonstraram alta precisão na predição de macronutrientes entre $0,76 \leq R^2 \leq 0,98$ para N, P, K, Ca, Mg e S, e micronutrientes, $0,64 \leq R^2 \leq 0,81$ para Fe, Mn, Cu, Mo, B, Cl e Na, para a cultura do algodão.

Em relação entre o desempenho e a distância interquartil (RPIQ) foram encontrados dados bastante divergentes entre os modelos de predição *Partial Least Squares Regression* – PLSR e *Support Vector Machine* – SVM, apresentando valores de 4,07 a 4,88 e 16,44 a 16,73, respectivamente (Figura 2). Mesmo assim, apesar de ambos os modelos serem considerados satisfatórios de acordo com Veum et al. (2015), o método de calibração *Support Vector Machine* – SVM atingiu valores de RPIQ mais confiáveis e precisos. As médias de RPIQ para ambos os modelos podem ser constatadas na Figura 2. Corroborando os resultados anteriores, o estudo de Johnson et al. (2021) avaliou a concentração de nitrogênio em grãos com casca e palha de arroz utilizando a espectroscopia de infravermelho combinada com o método de calibração *Partial Least Squares Regression* – PLSR, encontrando valores de $0,81 \leq R^2 \leq 0,87$, $3,62 \leq$ RPIQ $\leq 4,41$ e $0,14 \leq$ RMSECV ≤ 0.17, muito similares aos valores encontrados neste estudo. O R^2 encontrado pelos autores para estimativa do teor de nitrogênio foi de 0,81, utilizando-se o método de calibração *Partial Least Squares Regression* – PLSR e pré-processamento *Savitzky-Golay Second Derivative*.

Os resultados obtidos com o uso do modelo de predição *Support Vector Machine* – SVM sem a utilização de pré-processamentos, ou seja, com os dados brutos, podem ser visualizados na Figura 3. Observa-se que, mesmo assim, os resultados preditos e estimados apresentaram elevada similaridade, com um R^2 de 0,99. Ainda, são ilustrados os resultados do modelo de predição *Support Vector Machine* – SVM e pré-processamento *Savitzky-Golay Derivative* – SGD, tendo essa combinação obtido os melhores resultados no presente estudo. Um estudo feito por Zhai et al. (2012) comparou os métodos de predição *Partial Least Squares Regression* – PLSR e *Support Vector Machine Regression* – SVMR para estimar os teores de nitrogênio, fósforo e potássio em diversas plantas, utilizando a espectroscopia de reflectância no visível e no infravermelho próximo (Vis-NIR) baseada em laboratório. Os autores concluíram que o método *Support Vector Machine Regression* – SVMR obteve melhores precisões de estimativa, alcançando coeficientes de determinação de 0,706, 0,722 e 0,704

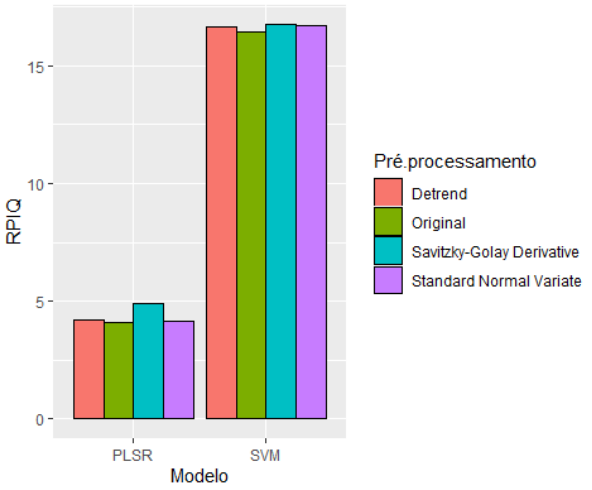


Figura 2. Comparativo dos valores da relação entre o desempenho e a distância interquartil (RPIQ) dos pré-processamentos utilizados entre os métodos de calibração multivariada *Partial Least Squares Regression* – PLSR e *Support Vector Machine* – SVM.

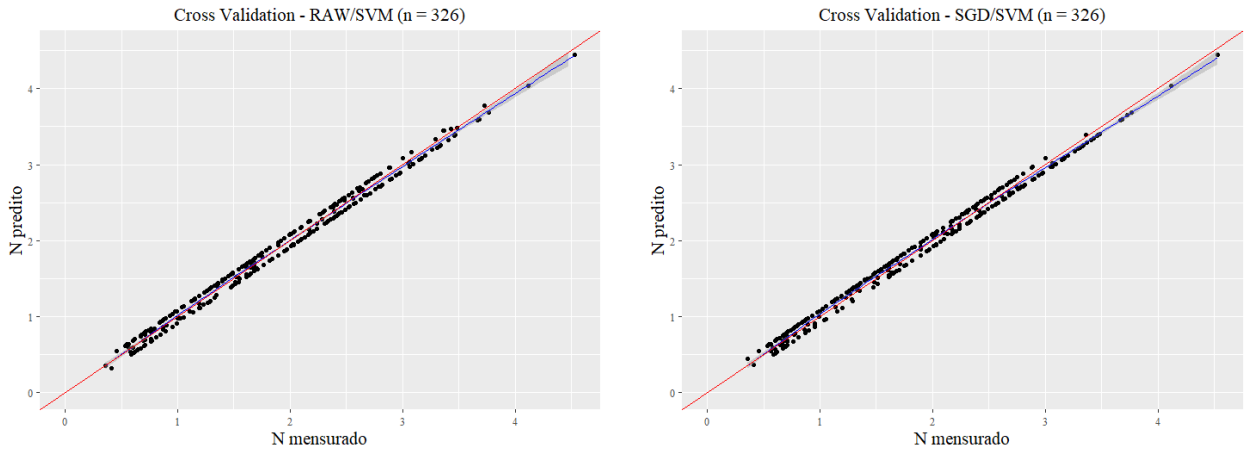


Figura 3. Valores preditos e mensurados por NIRs em 326 amostras de tecido vegetal de milho através do modelo de predição *Support Vector Machine* – SVM sem uso de pré-processamento (esquerda) e com uso de pré-processamento *Savitzky-Golay Derivative* – SGD (direita).

para as concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente, se comparado ao método *Partial Least Squares Regression* – PLSR, que obteve coeficientes de determinação de 0,663, 0,643 e 0,541. Na revisão de Prananto et al. (2020), dos vários estudos avaliados, os métodos de predição *Partial Least Squares Regression* – PLSR e *Stepwise Multilinear Regression* – SMLR foram os mais utilizados, ao passo que apenas poucos estudos utilizaram métodos de aprendizado de máquina, como o *Support Vector Machine* – SVM, para a modelagem dos dados. Nesse sentido, possivelmente seriam necessários mais trabalhos utilizando o método *Support Vector Machine* – SVM para a definição da concentração de nutrientes em tecido vegetal por meio da espectroscopia de infravermelho próximo, visto que no presente estudo foram encontrados ótimos resultados, assim como Zhai et al. (2012). Corroborando os resultados do presente estudo, o trabalho de Johnson et al. (2021) obteve melhores resultados com o pré-processamento *Savitzky-Golay Second Derivative* entre os cinco métodos de pré-processamento avaliados: sem pré-processamento espectral, *Standard Normal Variate* – SNV, *Standard Normal Variate* seguida de *Detrend* – SNV-Detrend, *first-order Savitzky-Golay Derivative* e *Savitzky-Golay Second Derivative*.

4 CONCLUSÕES

O uso da técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) foi capaz de predizer com acurácia e precisão os teores de nitrogênio em tecido foliar de milho, sendo uma alternativa para maior celeridade nas análises de tecido.

Os melhores resultados foram encontrados para os modelos de calibração *Support Vector Machine* – SVM e pré-processamento *Savitzky-Golay Derivative* – SGD.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Grupo de Estudos em Agricultura Digital (Gead) e ao Laboratório Federal de Defesa Agropecuária (Lanagro/RS) pelos incentivos e disponibilização do uso de seus equipamentos e instalações.

REFERÊNCIAS

BATTEN, G. D.; BLAKENEY, A. B. Applying NIR to crop nutrient assessment. **NIR News**, v. 2, n. 4, p. 10-11, 1991. DOI: http://doi.org/10.1255/nirn.68.

BERGAMASCHI, H. et al. Clima da Estação Experimental da UFRGS (e região de abrangência). Porto Alegre: UFRGS, 2003, 78 p.

R CORE TEAM. **R:** a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 4 mar. 2021.

DEMATTE, J. A. M.; DOTTO, A. C.; PAIVA, A. F. S.; SATO, M. V.; DALMOLIN, R. S. D.; ARAÚJO, M. S. B.; SILVA, E. B.; NANNI, M. R.; TEN CATEN, A.; NORONHA, N. C.; LACERDA, M. P. C.; ARAÚJO FILHO, J. C.; RIZZO, R.; BELLINASO, H.; FRANCELINO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VICENTE, L. E.; SANTOS, U. J.; SAMPAIO, E. V. S. B.; MENEZES, R. S. C.; SOUZA, J. J. L. L.; ABRAHÃO, W. A. P.; COELHO, R. M.; GREGO, C. R.; LANI, J. L.; FERNANDES, A. R.; GONÇALVES, D. A. M.; SILVA, S. H. G.; MENEZES, M. D.; CURI, N.; COUTO, E. G.; ANJOS, L. H. C.; CEDDIA, M. B.; PINHEIRO, E. F. M.; GRUNWALD, S.; VASQUES, G. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; SILVA, A. J.; VASCONCELOS BARRETO, M. C.; NÓBREGA, G. N.; SILVA, M. Z.; SOUZA, S. F.; VALLADARES, G. S.; VIANA, J. H. M.; TERRA, F. S.; HORÁK-TERRA, I.; FIORIO, P. R.; SILVA, R. C.; FRADE JÚNIOR, E. F.; LIMA, R. H. C.; FILIPPINI ALBA, J. M.; SOUZA JUNIOR, V. S.; BREFIN, M. L. M. S.; RUIVO, M.

L. P.; FERREIRA, T. O.; BRAIT, M. A.; CAETANO, N. R.; BRINGHENTI, I.; MENDES, W. S.; SAFANELLI, J. L.; GUIMARÃES, C. C. B.; POPPIEL, R. R.; SOUZA, A. B.; QUESADA, C. A.; COUTO, H. T. Z. The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): a general view, application and challenges. **Geoderma**, v. 354, p. 113793, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.043.

EMBRAPA. **Tecidos Vegetais**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/ 130252/1/2005CL-011.pdf. Acesso em: 11 out. 2021.

FERREIRA, P. H. **Redução da dimensionalidade para estimativa de teores de nutrientes em folhas e grãos de soja com espectroscopia no infravermelho**. Ponta Grossa: Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2017.

JOHNSON, J.-M.; SILA, A.; SENTHILKUMAR, K.; SHEPHERD, K.D.; SAITO, K. Application of infrared spectroscopy for estimation of concentrations of macro- and micronutrients in rice in sub-Saharan Africa. **Field Crops Research**, v. 270, p. 108222, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108222.

NETO, W. B. **Parâmetros de qualidade de lubrificantes e óleo de oliva através de espectroscopia vibracional, calibração multivariada e seleção de variáveis**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 14, n. 2, p. 198-219, 2003. DOI: http://doi.org/10.1590/S0103-50532003000200006.

PRANANTO, J. A.; MINASNY, B.; WEAVER, T. **Near Infrared (NIR) spectroscopy as a rapid and cost-effective method for nutrient analysis of plant leaf tissues**. Sydney: Chapter in Advances in Agronomy, 2020. v. 164. DOI: http://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.06.001.

PRANANTO, J. A.; MINASNY, B.; WEAVER, T. Rapid and cost-effective nutrient content analysis of cotton leaves using near-infrared spectroscopy (NIRS). **PeerJ**, v. 9, p. e11042, 2021. DOI: http://doi.org/10.7717/peerj.11042.

RODRIGUES, M; NANNI, M.R; CEZAR, E; SANTOS, G.L.A.A; REIS, A.S; OLIVEIRA, K.M; OLIVEIRA, R.B. **Espectroscopia Vis-NIR:** da estimativa da produção de massa seca da folha à previsão de macro e micronutrientes em lavouras de soja. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2020.

SANTOS, A. P. **Espectroscopia de infravermelho próximo em análises de solos e plantas**. Dissertação (Mestrado) – Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

SANTOS, G. A.; PEREIRA, A. B.; KORNDORFER, G. H. Uso do sistema de análises por infravermelho próximo (NIR) para análises de matéria orgânica e fração argila em solos e teores foliares de silício e nitrogênio em cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 1, p. 100-108, 2010.

SHENK, J.; WESTERHAUS, M.; HOOVER, M. Analysis of forages by infrared reflectance. **Journal of Dairy Science**, v. 62, n. 5, p. 807-812, 1979. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(79)83330-5.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222 p.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

VAN MAARSCHALKERWEERD, M.; HUSTED, S. Recent developments in fast spectroscopy for plant mineral analysis. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, p. 169, 2015. DOI: http://doi.org/10.3389/fpls.2015.00169.

VEUM, K. S.; SUDDUTH, K.A.; KREMER, R.J.; KITCHEN, N.R. Estimating a soil quality index with VNIR reflectance spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 79, n. 2, p. 637-649, 2015.

YARCE, C. J.; ROJAS, G. Near infrared spectroscopy for the analysis of macro and micronutrients in sugarcane leaves. **Zuckerindustrie-Sugar Industry**, v. 137, p. 707-710, 2012. DOI: http://doi.org/10.36961/si13611.

ZHAI, Y.; CUI, L.; ZHOU, X.; GAO, Y.; FEI, T.; GAO, W. Estimation of nitrogen, phosphorus, and potassium contents in the leaves of different plants using laboratory-based visible and near-infrared reflectance spectroscopy: comparison of partial least-square regression and support vector machine regression methods. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 7, p. 2502-2518, 2012. DOI: http://doi.org/10.1080/01431161.2012.746484.

Poda mecanizada na macieira e seus efeitos no Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

Mechanized pruning in apple trees and effects on the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Victória Reis Bortoluz[1], Bruno Tadashi Chiba da Silva[2], André Luis Vian[3], Gabriel Marson[4], Anna Elisa Petersen Gatelli[5], Gilmar Arduino Bettio Marodin[6], Fernando José Hawerroth[7], Leandro Bortoluz[8], Christian Bredemeier[9]

[1] *MSc. Engenheira Agrônoma, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, victoriareisbortoluz@gmail.com*

[2] *MSc. Engenheiro Agrônomo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, brunotadashi11@gmail.com*

[3] *Professor Doutor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Plantas de Lavoura. Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, andre.vian@ufrgs.br*

[4] *Engenheiro Agrônomo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Plantas de Lavoura. Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, grmarsong@gmail.com*

[5] *Graduanda de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Plantas de Lavoura. Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, annapgelisa@gmail.com*

[6] *Professor Doutor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Horticultura e Silvicultura, Porto Alegre (RS), Brasil, marodin@ufrgs.br*

[7] *Doutor, Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, fernando.hawerroth@embrapa.br*

[8] *Sócio-Proprietário, Campi Frutas, Vacaria (RS), Brasil, lebortoluz@campi.agr.br*

[9] *Professor Doutor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Plantas de Lavoura. Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, bredemeier@ufrgs.br*

RESUMO

A poda é um dos principais tratos culturais na cultura da macieira (*Malus domestica*), sendo responsável por potencializar e regular seu rendimento ao longo das safras. Neste estudo, buscou-se avaliar o efeito dos diferentes sistemas de poda mecanizada no comportamento espectral da macieira durante o ciclo da cultura, por meio do NDVI em duas alturas de leitura (1,20 m e 2,00 m). A partir das avaliações, pode-se observar que não houve interação entre os fatores tratamentos e altura de leitura. A resposta do NDVI nas diferentes alturas apresentou diferença estatística, em que os maiores valores encontrados foram obtidos na leitura de 1,20 m.

Palavras-chave: NDVI; greenseeker; poda mecanizada; índice de vegetação; *Malus domestica*.

ABSTRACT

Pruning is one of the main cultural treatments in apple (*Malus domestica*) cultures, being responsible for enhancing and regulating crop yields. In this study, we sought to evaluate the effect of different mechanized pruning systems on the spectral behavior of apple trees during the crop cycle, through NDVI at two reading heights (1.20 and 2.00 m). From the evaluations, no interaction between the factor treatments and reading height was verified. The response of NDVI at different heights showed statistical difference, where the highest values were obtained at a reading of 1.20 m.

Keywords: NDVI; greenseeker; mechanized pruning; vegetation index; *Malus domestica*.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000028

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

A produção mundial de maçãs na safra de 2021, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), foi de aproximadamente 129,1 milhões de toneladas, sendo o Brasil o 11º maior produtor mundial. Denominada como *Malus* x *Domestica* Borkh. (Korban; Skirvin, 1984), ou *M. domestica* Borkh. (Phipps et al., 1990), a macieira é supostamente um híbrido complexo, pertencente à família *Rosaceae*, ordem *Rosales* e subfamília *Pomoideae*.

A cultura da macieira é uma das primeiras que introduziu o sistema de produção integrada, buscando utilizar tecnologias de controle através do monitoramento de todas as etapas produtivas. Apesar disso, a maioria das práticas de manejo atualmente são realizadas de forma manual, demandando uma alta taxa de mão de obra, promovendo um elevado custo de produção. Uma das principais práticas de manejo demandadas pela macieira é a poda, que busca um equilíbrio entre o crescimento vegetativo e a produção de frutos (Rufato, 2016). Dessa forma, a poda confere às plantas um maior potencial produtivo e uma maior regularidade produtiva ao longo das safras agrícolas, além de facilitar todos os tratos culturais ao longo dos ciclos.

A Agricultura de Precisão (AP) pode se valer do uso do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) durante as fases do ciclo de produção da agricultura e da fruticultura. A utilização do NDVI na cultura da macieira permite um acompanhamento *in loco* e em tempo real da variabilidade espacial, podendo indicar deficiência nutricional e outros tipos de estresses, além da produção de biomassa vegetal, possibilitando o entendimento da dinâmica de crescimento vegetativo da cultura (Amaral; Molin, 2011; Rapaport et al., 2014).

Apesar disso, segundo Rufato (2016), há pouca disponibilidade de mão de obra para a poda, com dificuldades da otimização dessa prática cultural. Além da utilização de sistemas de condução que exijam menor intensidade de poda, o emprego da mecanização surge como uma alternativa. Para Mika et al. (1986), diversas espécies de frutas já são podadas mecanicamente, como oliveiras, videiras e citros. A eficácia da poda mecanizada depende do tipo de máquina, do tamanho e estrutura das árvores e da habilidade do condutor (Forshey, 1976).

De acordo com estudos realizados por Mika et al. (1986), a poda mecanizada em macieiras alterou significativamente a estrutura do dossel, tornando-o compacto e contínuo. Além disso, os frutos oriundos do tratamento com poda mecanizada apresentaram menores tamanhos, peso médio e coloração, apesar dos maiores rendimentos. Segundo Forshey (1976), a poda mecanizada em macieiras não deve substituir completamente a poda manual, e sim ser combinada com a poda manual apropriada, visando reduzir os custos de produção e viabilizando a cadeia produtiva.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento espectral do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) da macieira, durante um ciclo de produção, sob diferentes sistemas de poda.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na safra agrícola de 2020/2021, sendo conduzido em parte de um pomar comercial pertencente à empresa Campi Frutas Ltda., localizada no município de Vacaria (RS). O clima e tipo do solo do local de estudo é classificado como temperado úmido, com verões amenos (Cbf), segundo a classificação de Koppen, e Latossolo Bruno Aluminoférrico típico (LBaf). A quadra avaliada possui uma densidade populacional de 5.000 plantas/ha, cultivado com o espaçamento de 4 metros entre fileiras e por 0,5 metro entre plantas, totalizando 2,35 hectares de cultivo. A idade do pomar é 15 anos, e a cultivar avaliada foi a 'Maxi Gala' sob o porta-enxerto M9.

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, totalizando 20 unidades experimentais e com quatro repetições. Os tratamentos avaliados foram: testemunha (sem poda), poda padrão da unidade produtiva (poda padrão), poda mecanizada de outono, poda mecanizada de verão e poda mecanizada de outono e verão. Cada unidade amostral foi composta por três linhas de cultivo e com 13 metros de comprimento cada, sendo avaliadas as 10 plantas centrais da área central da linha central. A poda mecanizada foi realizada por meio dos implementos podadores denominados HLC-3 e HLC-5, da empresa Hidrautec (Figura 1), que foram devidamente regulados, visando podar a parte superior e lateral das plantas, conforme a estatura do dossel vegetal e nos períodos indicados nos tratamentos.

As avaliações do NDVI foram realizadas em duas faixas de altura, sendo 1,20 m e outra a 2,00 m. O equipamento utilizado foi o sensor Greenseeker®, que estima valores de NDVI usando a relação $(\rho ivp - \rho v)/(\rho ivp + \rho v)$, onde ρivp e ρv se referem à reflectância do infravermelho próximo e vermelho, respectivamente. O NDVI foi avaliado mensalmente durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da macieira, com avaliações a cada 30 dias após período de dormência. A nutrição das plantas e o controle de pragas e doenças foram realizados pelo produtor seguindo as recomendações agronômicas e as boas práticas de manejo.

Figura 1. Poda mecanizada (A) e Poda padrão do produtor (B).

Os dados foram previamente analisados quanto à presença de outliers e o diagnóstico da normalidade. Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($p \leq 0,05$), e em caso de significância as médias dos diferentes tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As análises foram realizadas no Software RStudio.

3 RESULTADOS

Os tratamentos com diferentes sistemas de poda (mecanizada e manual) provocaram diferentes respostas nos valores do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) durante o ciclo de desenvolvimento, entre os meses de dezembro de 2020 e fevereiro de 2021, quando avaliado na altura de 1,20 m (Figura 2A), e entre as datas dentro do mês de novembro de 2020 para a altura de 2,00 m (Figura 2B).

As diferentes respostas no vigor das plantas no retorno da brotação destas podem ser observadas na análise estatística, em que se destaca o início da formação do dossel vegetativo (novembro) na altura de 2,00 m, e na fase final do ciclo (antes da colheita) na altura de 1,20 m. Este, por sua vez, coincide com as épocas de maior demanda nutricional e de fotoassimilados pela planta, sendo os estádios de desenvolvimento e maturação dos frutos.

Ao se comparar a resposta do NDVI nas diferentes alturas, pode-se observar que não houve diferença estatística entre os tratamentos. Assim, pode-se avaliar a média obtida de todos os tratamentos em relação às diferentes alturas. Independentemente da data de avaliação, o NDVI na altura de 2,00 m foi inferior estatisticamente ao NDVI observado na altura de 1,20 m (Figura 3A). Tal resultado reflete o fato de a estrutura da planta ser em forma trapezoidal, a qual apresenta

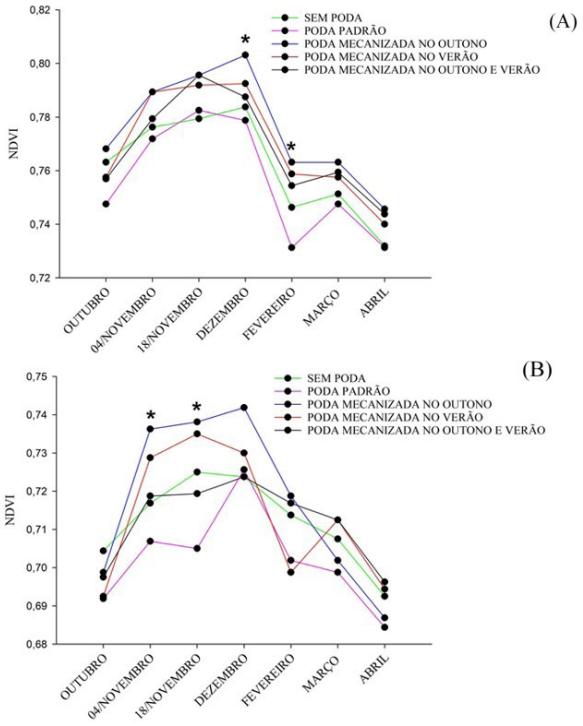


Figura 2. Resposta do NDVI ao longo do ciclo da cultivar 'Maxi Gala' nas alturas de 1,20 m (A) e 2,00 m (B) nas diferentes formas de poda.

maior acúmulo de biomassa no estrato inferior, e assim maior NDVI. Quando se comparou a resposta do NDVI ao longo do ciclo aos diferentes tratamentos, os meses de novembro, dezembro e fevereiro diferiram estatisticamente dos demais (Figura 3B).

Além disso, outra informação importante que pode ser analisada com base nos resultados apresentados é o comportamento espectral ou a resposta do NDVI ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura. Baseando-se nas observações de campo, pode-se definir e associar com os valores de NDVI que o

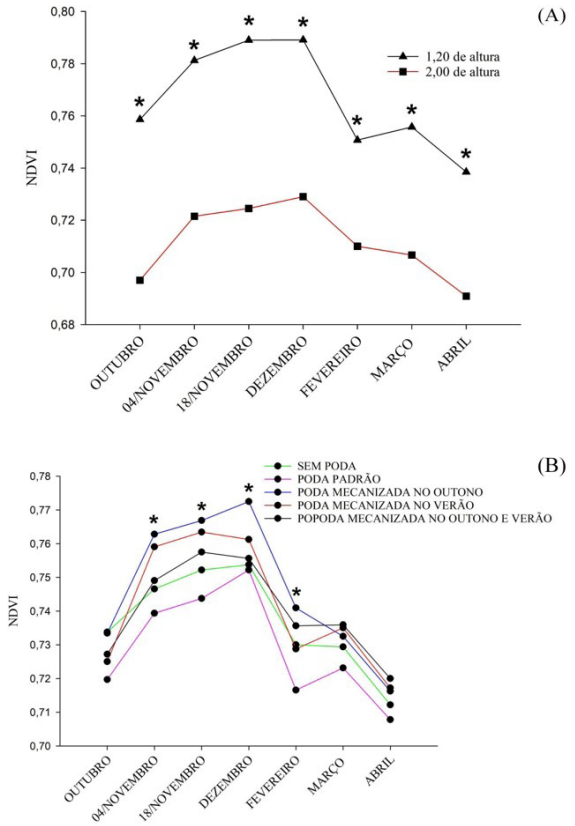


Figura 3. Resposta do NDVI da cultivar 'Maxi Gala' ao longo do ciclo, em função das alturas 1,20 m e 2,00 m (A) e em função dos tratamentos (B).

mês de outubro é o período em que a cultura está em plena brotação e com bom desenvolvimento foliar. Durante os meses de novembro e dezembro, quando as plantas estão no período de frutificação, observa-se que o NDVI fica próximo à faixa de saturação. Já nos meses de fevereiro, março e abril, a cultura começa o processo de senescência das folhas e posteriormente entra no período de dormência.

Ao observar a resposta do NDVI da cultivar 'Maxi Gala' nas datas avaliadas em função dos tratamentos (Figura 4), constatou-se que nos meses de outubro, março e abril não houve diferença estatística para os diferentes tipos de poda aplicados na cultura. Já nos meses de novembro, dezembro e fevereiro, o tratamento com poda mecanizada durante o outono apresentou maior NDVI que o tratamento com poda padrão. Isso se deve ao fato de que, na poda padrão, é realizada a retirada de ramos pontuais, conhecidos como ramos ladrões, que competem diretamente com frutos por fotoassimilados. Enquanto isso, na poda mecanizada há a retirada de uma maior quantidade de ramos, buscando manter a estrutura trapezoidal da planta, proporcionando um aumento na penetração de luz no dossel da planta e, consequentemente, maior NDVI.

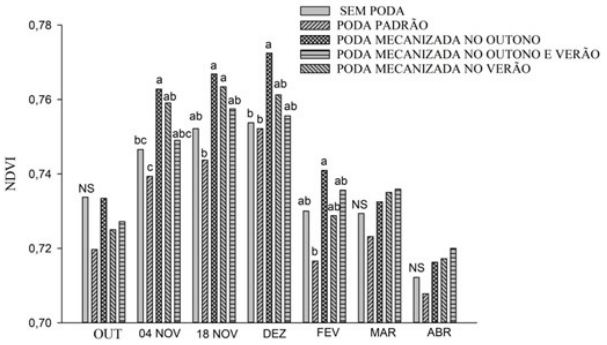


Figura 4. Resposta do NDVI da cultivar 'Maxi Gala' nas datas avaliadas em função dos tratamentos.

De forma geral, os resultados obtidos vão ao encontro com a observação feita por Zhang et al. (2003), de que a utilização do índice de vegetação normalizada permite o monitoramento dinâmico da vegetação em larga escala de forma ecologicamente significativa e não requer pré-processamento de dados.

O emprego de ferramentas que realizam o mapeamento do desenvolvimento de plantas e do vigor das plantas ao longo do ciclo produtivo da macieira torna-se essencial para que se possa identificar a variabilidade de crescimento vegetativo ao longo do pomar. Os índices de vegetação, como o NDVI, permitem o monitoramento do desenvolvimento das plantas e, assim, possibilitam auxiliar o processo de poda, indicando o ajuste em tempo real da altura de poda dos ramos laterais ao longo de cada linha de cultivo do pomar.

4 CONCLUSÃO

O tipo e a época de poda influenciam diretamente no NDVI. A altura da leitura também influencia na resposta do NDVI da cultivar 'Maxi Gala'. Dessa forma, o NDVI se mostra uma ferramenta útil na avaliação do comportamento espectral de macieiras.

A fim de uma identificação mais acurada e precisa dos índices de vegetação na macieira, respeitando a singularidade da cultura, faz-se necessário a criação de modelos matemáticos que a contemplem.

O monitoramento da variabilidade espacial do crescimento vegetativo do pomar por meio de NDVI é uma alternativa de ajuste em tempo real da altura de poda das macieiras.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão de bolsa de mestrado, possibilitando dedicação integral às atividades acadêmicas. À empresa Campi Frutas, por for-

necer o pomar para tornar possível a realização deste experimento.

REFERÊNCIAS

AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P. Sensor óptico no auxílio a recomendação de adubação nitrogenada em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 12, p. 1633-1642, 2011.

FORSHEY, C. G. **Training and pruning apple trees**. Geneva: Cornell Cooperative Extension Publication, 1976. 24 p. Disponível em: https://ecommons.cornell.edu/bitstream/handle/1813/17817/IB%20112.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Acesso em: 09 jun. 2020.

KORBAN, S. S.; SKIRVIN, R. M. Nomenclature of the cultivated apple. **HortScience**, v. 19, n. 2, p. 177-180, 1984.

MIKA, A. Physiological responses of fruit trees to pruning. **Horticultural Reviews**, v. 8, p. 337-378, 1986. DOI: https://doi.org/10.1002/9781118060810.ch9.

PHIPPS, J. B.; ROBERTSON, K. R.; SMITH, P. G.; ROHRER, J. R. A checklist of the subfamily Maloideae (Rosaceae). **Canadian Journal of Botany**, v. 68, n. 10, p. 2209-2269, 1990.

RAPAPORT, T.; HOCHBERG, U.; RACHMILEVUTVH, S.; KARNIELI, A. The effect of differential growth rates across plants on spectral predictions of physiological parameters. **PLOS ONE**, v. 9, n. 2, 2014.

RUFATO, A. R. Podando macieiras no sistema Tall Spindle. **A Vindima**, Flores da Cunha, n. 85, p. 7, 2016. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/148318/1/A-vindima-junho-85-p72016.pdf. Acesso em: 21 abr. 2022.

ZHANG, X.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B.; STRAHLER, A. H.; HODGES, J. C. F.; GAO, F.; REED, B. C.; HUETE, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing Of Environment**, v. 84, n. 3, p. 471-475, 2003. DOI: http://doi.org/10.1016/s0034-4257(02)00135-9.

27 Caracterização de doenças fúngicas de *Vitis vinifera* por radiometria espectral

Characterization by spectral radiometry of fungal diseases of Vitis vinifera

Pâmela Aude Pithan[1], Jorge Ricardo Ducati[2], Lucas da Ressurreição Garrido[3], Diniz Carvalho de Arruda[4], Rosemary Hoff[5], Adriane Brill Thum[6]

[1] *Mestre, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), Brasil, pamelapithann@gmail.com*

[2] *Doutor, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), Brasil, jorge.ducati@ufrgs.br*

[3] *Doutor, Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, lucas.garrido@embrapa.br*

[4] *Doutor, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), Brasil, dinizcarvalho88@hotmail.com*

[5] *Doutora, Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, rose.hoff@embrapa.br*

[6] *Doutora, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), Brasil, adrianebt@unisinos.br*

RESUMO

Este estudo teve como objetivo detectar alterações espectrais de folhas de videira (*Vitis vinifera* cv. Cabernet Sauvignon) com sintomas iniciais de míldio (*Plasmopara viticola*), oídio (*Uncinula necator*), pé-preto (*Dactylonectria macrodidyma*) e doença de Petri (*Phaeoacremonium* spp.). Plantas foram inoculadas com os patógenos e medida a reflectância, e a análise estatística revelou diferenças entre espectros de plantas sintomáticas e de testemunhas. Com isso, os espectros de reflectância foram investigados para cada doença. Um conjunto de limiares, razões de reflectância em comprimentos de onda selecionados (nm), foram: R443/R496, R443/R573, R443/R695, R443/R1900, R496/R573, R496/R695, R516/R1900 e R1900/R2435. Os espectros de plantas sintomáticas apresentaram alterações de forma de até 20% em relação às plantas saudáveis. Esses resultados são potencialmente úteis para o desenvolvimento de dispositivos de baixo custo para uso em campo, fornecendo detecção de doenças em tempo real para avaliação precoce do estado de saúde do vinhedo.

Palavras-chave: reflectância da videira; *Plasmopara viticola*; *Uncinula necator*; *Dactylonectria macrodidyma*; *Phaeoacremonium* spp.

ABSTRACT

The objective of this study was to detect spectral alterations in grapevine leaves (*Vitis vinifera* cv. Cabernet Sauvignon), with initial symptoms of downy mildew (*Plasmopara viticola*), powdery mildew (*Uncinula necator*), blackfoot (*Dactylonectria macrodidyma*) and Petri disease (*Phaeoacremonium* spp.). Plants were inoculated with the pathogens and their reflectance was measured. The statistical analysis revealed differences between spectra of symptomatic and control plants and thus, the reflectance spectra were investigated for each disease. A set of threshold, reflectance ratios at selected wavelengths (nm) were: R443/R496, R443/R573, R443/R695, R443/R1900, R496/R573, R496/R695, R516/R1900 and R1900/R2435. The spectra of symptomatic plants showed shape changes of up to 20% compared to healthy plants. These results are potentially useful for developing low-cost devices for field use, providing real-time disease detection for early assessment of vineyard health.

Keywords: grapevine reflectance; *Plasmopara viticola*; *Uncinula necator*; *Dactylonectria macrodidyma*; *Phaeoacremonium* spp.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000040

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

As doenças bióticas induzem alterações perceptíveis no espectro de reflectância das plantas, principalmente devido a alterações na clorofila e no teor de água, entre outros fatores. A detecção dessas alterações pode fornecer informações úteis para o desenvolvimento de métodos e técnicas voltadas à prevenção de doenças. A espectroscopia de reflectância e transmitância visível e infravermelho próximo (VNIR) foi aplicada para avaliar a condição de estresse de plantas infectadas por patógenos como o fungo *Penicillium digitatum* em frutas cítricas (Lorente et al., 2015). Investigando macieiras, Delalieux et al. (2007) identificaram as regiões espectrais mais importantes para separar plantas sadias de plantas com estresse causado por *Venturia inaequalis*, enquanto Graeff et al. (2006), em um estudo em plantas de trigo, indicaram que a detecção de doenças e discriminação de oídio por meio de medidas de reflectância podem ser feitas por faixas de comprimento de onda específicas. Naidu et al. (2009) e Junges et al. (2018) relataram efeitos nos espectros de reflectância observados principalmente no VNIR, em videiras infectadas pelo vírus do enrolamento da folha. De Bei et al. (2011) demonstraram que o NIR pode ser usado como um método simples e rápido para detectar o estado hídrico da videira, e Beghi et al. (2017) investigaram a aplicabilidade da espectroscopia VNIR para avaliação rápida do *status* fitossanitário da uva.

No entanto, descrições detalhadas de quais mudanças espectrais ocorrem e aplicações desse conhecimento que podem beneficiar os processos produtivos ainda não foram relatadas. Geralmente, a detecção de uma doença ocorre quando a doença já atingiu uma parte relativamente grande da parcela plantada, dificultando a aplicação de medidas de proteção. A detecção precoce pode induzir ações preventivas, reduzindo perdas e custos, além de trazer benefícios ambientais por meio da redução de pesticidas (Gebbers; Adamchuk, 2010; Komárek et al., 2010; Mahlein, 2016). Métodos foram desenvolvidos para detectar doenças de plantas com base em análise química ou em inspeção visual (Sankaran et al., 2010), mas, nesses casos, as doenças já estão bem desenvolvidas. A taxa de incidência e a importância de determinadas doenças fúngicas em videiras variam de ano para ano, dependendo da variedade de uvas, da região, das práticas agrícolas e das condições meteorológicas (Jackson, 2016; Freire et al., 2017). As doenças fúngicas têm uma alta taxa de incidência em regiões vitícolas sob certas condições ambientais, sendo a alta umidade uma das mais relevantes (Keller, 2020). Nas regiões vitícolas do Sul do Brasil, períodos de altas temperaturas e umidade são frequentes durante a estação vegetativa, e surtos de doenças fúngicas são comuns em vinhedos desprotegidos (Camargo et al., 2008).

No contexto da agricultura de precisão, a detecção precoce de doenças vegetais através da espectroscopia de reflectância pode transformar a gestão agrícola. Sensores instalados em drones ou dispositivos móveis permitem a coleta contínua de dados em tempo real, com fornecimento de informações detalhadas sobre a saúde das plantas em áreas extensas, possibilitando a aplicação precisa e localizada de fungicidas e outros tratamentos, otimizando recursos e reduzindo o impacto ambiental.

Abordando esses problemas, presentemente este estudo relata uma pesquisa em que foram selecionadas quatro doenças: duas que atacam todas as partes verdes da videira, e duas que atacam troncos e raízes, resultando em grandes perdas. O míldio (*Plasmopara viticola*), a principal doença da videira no Brasil, penetra nos tecidos pelos estômatos muito rapidamente e, sem um controle químico adequado, em períodos de chuvas ou alta umidade, pode destruir toda a parte vegetativa e reprodutiva da videira. O oídio (*Uncinula necator*) é outro patógeno importante em quase todas as regiões vitícolas, sendo mais grave em anos mais secos. A doença de Petri (*Phaeoacremonium* spp.), induzida pelo estresse hídrico, infecta os vasos condutores e também está envolvida no declínio e morte de plantas. A doença do pé-preto (*Dactylonectria macrodidyma*), que se desenvolve em condições de solos mal drenados e argilosos, afeta tipicamente as raízes de videiras jovens (Jackson, 2008; Pertot et al., 2017).

Considerando essas doenças, o objetivo deste estudo foi a aplicação de medidas de reflectância espectral ao mapeamento de alterações espectrais de folhas de videira induzidas pelas doenças citadas, gerando índices para sua detecção. Os resultados foram gerados pelo uso de espectrorradiômetro em plantas sintomáticas e sadias de *Vitis vinifera*, var. Cabernet Sauvignon, observado *in vivo* em casa de vegetação.

2 MATERIAL E MÉTODO

As amostras de plantas sadias e infectadas de *Vitis vinifera*, var. Cabernet Sauvignon, foram preparadas no Laboratório de Fitopatologia da Embrapa Uva e Vinho, unidade da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) localizada em Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, Brasil, onde está disponível uma coleção de fungos filamentosos.

Patógenos isolados de *Dactylonectria macrodidyma* e de *Phaeoacremonium* spp., da coleção de fungos fitopatogênicos (SISGEN N° A99F2F2), foram replicados em meio de crescimento BDA (batata-dextrose-

-agar), e mantidos a 24 °C e fotoperíodo de 12 horas durante 20 dias. A suspensão de inóculo resultante da raspagem dos conídios produzidos foi ajustada para a concentração de 106 esporos/ml por meio de hemocitômetro, e ambos patógenos foram inoculados por imersão de raízes previamente cortadas na suspensão de inóculo durante 15 minutos, sendo preparadas dez plantas para cada patógeno, sendo também preparado um lote único de dez plantas de controle (sadias) com raízes cortadas imersas em água destilada e esterilizada. Foi dado um período de 13 dias entre a inoculação e as medições espectrais.

Os inóculos de *Plasmopara viticola* foram obtidos a partir da coleta de folhas infectadas de um vinhedo de Cabernet Sauvignon da região da Serra Gaúcha, sendo as folhas mantidas em câmara úmida por 48 horas para que os esporângios fossem coletados. A suspensão de inóculos foi ajustada para 105 esporângios/ml e pulverizada em 10 plantas. Este lote, com o lote de 10 plantas controle, foi incubado a 24 °C e umidade relativa de 92% durante oito dias com fotoperíodo de 12 horas, para poder ser medido espectralmente. O inóculo de *Uncinula necator* ocorreu espontaneamente em folhas de videiras da variedade dentro de casa de vegetação. Dez plantas foram preparadas e, neste caso, 10 plantas controle foram pulverizadas com fungicida do grupo triazol para evitar a infecção pelo patógeno. As plantas com sintomas de oídio permaneceram na casa de vegetação até as medições.

O experimento teve blocos casualizados com 10 repetições com os seguintes tratamentos: a) plantas inoculadas com *P. viticola*; b) controle sem inoculação de *P. viticola*; c) plantas inoculadas com *U. necator*; d) controle sem infecção por *U. necator*; e) plantas inoculadas com *D. macrodidyma*; f) plantas infectadas com *Phaeoacremonium* spp.; e g) controles para patógenos de raízes. No total, 70 plantas estavam disponíveis para medições.

Os procedimentos descritos foram feitos para a campanha de 2017, repetindo-se com novas plantas em 2018, sendo que para o míldio foram medidas cinco plantas de controle.

As medidas espectroscópicas foram realizadas por espectrorradiômetro FieldSpec® 3, faixa espectral entre 350 nm e 2.500 nm, intervalos de valores de reflectância entre 0,0 e 1,0 nm (Malvern Panalytical, 2020). A calibração foi feita por placa de referência interna Spectralon® (Labsphere, Inc., North Sutton, NH, EUA), e as medições por sonda Leaf Clip com fonte de luz halógena interna.

Cada lote de plantas foi formado por 10 vasos por doença, sendo feitas leituras de três folhas localizadas na parte central da planta e previamente marcadas. Em cada folha foram feitas quatro medidas, sempre na face adaxial, evitando o sistema vascular. Todas as plantas eram bastante jovens e tinham cerca de seis ou sete folhas. Foi medido um lote completo de plantas assintomáticas e depois o lote de plantas sintomáticas. Para as amostras de oídio em 2017, as medições foram realizadas em duas fases: a primeira com a doença em estágios iniciais (oídio 1), e seis dias após com a doença em estágio avançado (oídio 2). Em 2018, apenas a primeira fase foi medida. As plantas com os outros patógenos foram medidas apenas no estágio inicial.

Na maioria dos casos, a região espectral no ultravioleta (350 nm - 400 nm) apresentou muito ruído, dificultando a detecção e análise de características espectrais, não sendo considerada em análise dos espectros. Para cada folha, foi calculada uma média dos quatro espectros, e para cada planta foi produzida uma média para as três folhas, sendo todos os espectros normalizados. O método desenvolvido neste estudo foi baseado na equação a seguir, em que Rλ é a reflectância em comprimento de onda (λ) e o denominador da equação é a área ou integral de um espectro. O espectro normalizado teria para cada λ um novo valor R'λ (Equação 1).

$$R'\lambda = \frac{R\lambda}{\sum_{n=1}^{n} R_{400} + R_{401} + \ldots + R_{2500}} \quad (1)$$

Tal normalização, apresentada na equação acima, altera apenas a escala vertical de um espectro, com a finalidade de auxiliar na inspeção visual dos espectros a serem comparados, facilitando a detecção de diferenças entre eles. No entanto, para a maioria das operações, a normalização não foi necessária. O banco de dados teve 90 espectros na primeira fase de medições (2017) e 65 espectros na segunda fase de plantas de estufa (2018).

A alteração espectral em plantas de videiras pode ser sutil, e métodos apropriados para detectar essas alterações devem ser desenvolvidos. A sutileza das mudanças espectrais por doenças na vegetação e a dificuldade em sua detecção têm sido relatadas (Delalieux et al., 2007; Ettabaa; Salem, 2018). A detecção de tais características é possível quando os espectros analisados têm uma alta relação sinal-ruído (SNR). No caso estudado, foi possível estimar a qualidade das aquisições de reflectância por meio de uma avaliação SNR. O fabricante do espectrorradiômetro cita três comprimentos de onda como referência para ruído, um para cada sensor dentro do aparelho (Malvern Panalytical, 2020), sendo 700 nm (VNIR), 1.400 nm

(SWIR1) e 2.100 nm (SWIR2). No entanto, para os espectros de vegetação medidos, esses comprimentos de onda estão próximos de características espectrais, como as depressões de *red edge* e absorção de água. O SNR foi avaliado nos comprimentos de onda próximos dos citados pelo fabricante (620 nm, 1.150 nm e 2.200 nm). Além disso, foram derivados valores de reflectância que são a média para uma planta inteira, calculada sobre três folhas, e como uma segunda avaliação de qualidade, foram derivados os desvios-padrão para essas médias.

Os valores de reflectância dos espectros das folhas de controle (sadias) foram divididos pela reflectância dos espectros das folhas sintomáticas em cada comprimento de onda ao longo de todo o domínio espectral, gerando 'relação de espectro', uma imagem relacionada ao espectro com um eixo vertical adimensional. Supondo que as alterações espectrais em plantas sintomáticas sejam sutis, ambos espectros tendem a ser quase iguais, e o quociente resultante tende a apresentar valores quase iguais à unidade ao longo de todo o domínio do comprimento de onda. Uma análise de várias razões de espectro geradas por vários pares de espectros, observando comprimentos de onda com quocientes não unitários consistentes, revelaria as regiões espectrais onde os espectros de plantas sintomáticas eram diferentes dos espectros de plantas saudáveis; assumindo que as doenças provocariam essas alterações espectrais. A análise sistemática produziu uma lista das principais alterações espectrais em torno de oito comprimentos de onda.

Investigou-se o impacto espectral relativo de cada doença, expresso pela razão entre a intensidade nos oito comprimentos de onda, tomados dois a dois, resultando em 28 combinações pares de comprimentos de onda, ou proporções, para qualquer espectro medido. Obteve-se para cada doença 10 plantas individuais, portanto, 10 espectros, e assim para cada doença, tendo para um determinado par de comprimentos de onda, 10 valores de razão, assumindo estarem distribuídos de forma gaussiana. Como método analítico, foram projetadas curvas gaussianas com 50 pontos que se ajustaram à distribuição das 10 razões de reflectância. Para cada uma das 28 razões, foram traçadas as curvas para cada doença, procurando os casos com melhor separação entre as doenças. Foi selecionado um conjunto de oito razões das quais as doenças eram mais bem separadas por meio de limiares característicos de cada doença.

A partir dos comprimentos de onda selecionados, realizou-se a análise discriminante canônica no programa estatístico SPSS, método Stepwise, para os grupos de plantas com doenças e também para os grupos de plantas de doenças junto com suas testemunhas. Como os grupos de testemunhas foram desenvolvidos associados às suas respectivas doenças, seria possível que fisiológica e espectralmente os grupos de testemunhas teriam relações entre si. Por esse motivo, uma das análises foi realizada sem o conjunto de testemunhas, a fim de dar maior precisão aos resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira avaliação da qualidade das medidas foi a relação sinal-ruído (SNR). Para uma medição original de folha única, proveniente de quatro aquisições consecutivas, os valores típicos de SNR foram 480 em λ = 620 nm, 720 em λ = 1.150 nm e 1.000 em λ = 2.200 nm. Tais valores são indicadores de medições de alta qualidade (Schroeder, 1999).

Com relação aos desvios-padrão de uma medição de planta, com médias realizadas em três folhas, os valores típicos de reflectância normalizada para qualquer planta foram 6x10−6, 5x10−6 e 8x10−6 nos três comprimentos de onda mencionados. Esses valores são cerca de duas ordens de magnitude menores do que a faixa de variação dos valores de reflectância (normalizados) mostrados na Figura 1, onde são exibidas as diferenças espectrais devido aos efeitos do patógeno. As próprias diferenças estão na faixa de 10-5 na Figura 1. Portanto, como os desvios-padrão em geral são cerca de 10 vezes menores do que as diferenças exibidas, concluiu-se que as diferenças espectrais entre as doenças estudadas foram consistentes.

As razões entre os espectros de reflectância de folhas de plantas doentes e plantas de controle saudáveis são apresentadas na Figura 2. Observam-se que as alterações espectrais devido a diferentes doenças registram quase nos mesmos comprimentos de onda, por exemplo, o míldio e o pé-preto induzem mudanças em um espectro normal nos mesmos locais. Nesses casos, a observação de um espectro alterado pode ser útil, indicando que a planta é portadora de uma doença, mas não exatamente qual doença. Assumiu-se a hipótese de que as alterações metabólicas induzidas na planta por doença são características, e que as alterações espectrais têm magnitudes típicas de cada doença. Dessa forma, um espectro de uma planta sintomática, em relação a um espectro de uma planta sadia, apresentaria não apenas alterações espectrais em determinados comprimentos de onda, mas também as magnitudes dessas alterações seriam características de cada doença.

A partir da inspeção da Figura 2, foram selecionados oito comprimentos de onda em que as separações entre doenças foram mais evidentes, sendo os seguin-

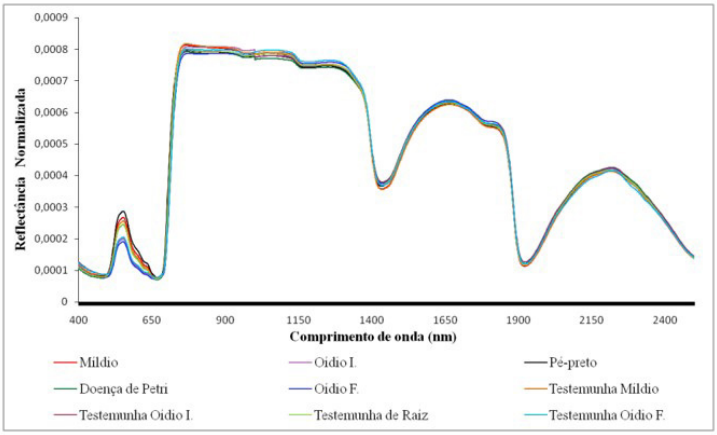


Figura 1. Espectro da reflectância média normalizada dos patógenos e dos controles. Conforme Pithan et al. (2021).

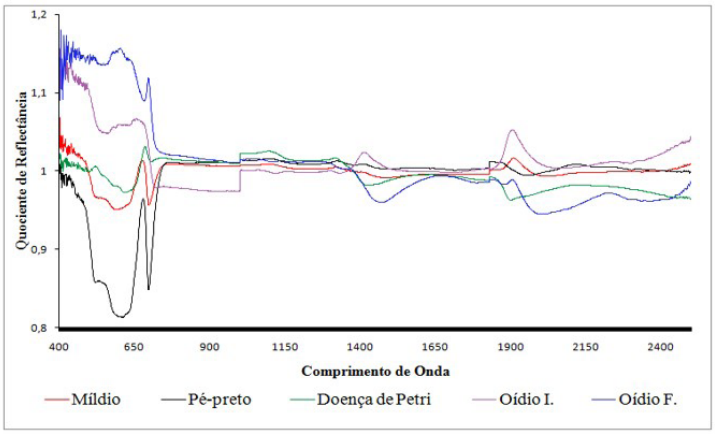


Figura 2. Razões de reflectância entre plantas sintomáticas es seus respectivos controles ao longo dos comprimentos de onda medidos. Os oito comprimentos de onda selecionados como marcadores de alterações espectrais induzidas por doenças são mostrados. Conforme Pithan et al. (2021).

tes: no visível, em 443, 496, 516, 573 e 695 nm, e notadamente alguns estavam próximos às absorções de clorofila (450 e 670 nm), sugerindo que os efeitos das doenças afetam a assimilação de clorofila. No infravermelho próximo, os comprimentos de onda selecionados foram em 1.420, 1.900 e 2.435 nm, tendo proximidade com as características de absorção de água nesses comprimentos de onda, sugerindo que o metabolismo da água também poderia ser afetado.

Os comprimentos de onda selecionados foram utilizados nas análises discriminantes cujos resultados para 2017 são apresentados nas Tabelas 1 e 2. Na Tabela 1, está o resultado da análise discriminante para os cinco grupos sintomáticos, com acurácia geral de 94,3%. Alguma confusão apareceu entre as doenças que afetam as raízes. Na Tabela 2, estão os resultados da análise de todos os oito grupos, ou seja, os cinco grupos sintomáticos e os três grupos controle, com acurácia de 85,7%. A partir da Tabela 2, observa-se que os grupos de controle não apenas estão separados, mas também revelam alguma confusão com seus respectivos grupos sintomáticos. Essa associação possivelmente decorre do fato de que ambos os grupos iniciaram nas mesmas condições; para outro par controle-doença, envolvendo outra doença, as condições iniciais foram diferentes. Este efeito sugere que dados de diferentes condições iniciais, sejam estações ou locais, deveriam ter suas próprias medidas de controle. Além disso, não apenas considerando os descritores espectrais internos de uma planta sintomática para o diagnóstico, mas uma medida de calibração de uma planta saudável sendo associada.

Assumindo que uma determinada doença imprime uma forma de curva espectral, uma maneira possível de descrevê-la seria usando descritores internos ao espectro, como razões entre os valores de reflectância nos comprimentos de onda característicos. Dessa forma, cada doença teria um conjunto de razões, derivado e tendo a vantagem de ser para cada espectro, ou seja, a informação que revela a doença o espectro de uma planta sintomática. Em última análise, seria possível derivar para cada doença um conjunto de

Tabela 1. Matriz de confusão (%) resultante da classificação dos valores de reflectância foliar dos oito comprimentos de onda selecionados para melhor separação entre as doenças fúngicas analisadas (exceto controles). 1. míldio; 2. pé-preto; 3. doença de Petri 1; 4. oídio 1; 5. oídio 2. resultados de 2017. Conforme Pithan et al. (2021).

Doença	1	2	3	4	5	Σ
1	100	0	0	0	0	100
2	0	85.7	14.3	0	0	100
3	0	14.3	85.7	0	0	100
4	0	0	0	100	0	100
5	0	0	0	0	100	100

Tabela 2. Matriz de confusão (%) resultante da classificação dos valores de reflectância foliar dos oito comprimentos de onda selecionados para melhor separação entre as doenças fúngicas analisadas, incluindo seus controles. 1. míldio; 2. controle do míldio; 3. pé-preto; 4. doença de Petri; 5. controle de raízes; 6. oídio 1; 7. controle de oídio 1; 8. oídio 2; 9. controle de oídio 2. Resultados de 2017. Conforme Pithan et al. (2021).

Doença	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Σ
1	85.7	0	0	14.3	0	0	0	0	0	100
2	14.3	85.7	0	0	0	0	0	0	0	100
3	0	0	71.4	14.3	14.3	0	0	0	0	100
4	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100
5	0	0	0	0	85.7	14.3	0	0	0	100
6	0	0	0	0	0	100	0	0	0	100
7	0	0	0	0	0	0	85.7	0	14.3	100
8	0	0	0	0	0	14.3	0	85.7	0	100
9	0	0	0	0	0	0	28.6	0	71.4	100

razões características, com valores atuando como limiares. A vantagem deste método é que seria possível chegar a um diagnóstico medindo a reflectância em comprimentos de onda atuando como marcadores.

Para os patógenos estudados, as razões de reflectância que apresentaram melhores desempenhos foram as combinações R443/R496, R443/R573, R443/R695, R443/R1900, R496/R573, R496/R695, R516/R1900 e R1900/R2435. A Tabela 3 apresenta os valores dessas razões para a safra de 2017, observando-se que as duas doenças foliares mais importantes da videira (míldio e oídio) diferiram na reflectância a razão R496/R573 das medidas do pé-preto, com valor médio de 0,40 com desvio-padrão de 0,02. Isto significa que os efeitos da doença do pé-preto, medidos em 10 plantas sintomáticas, levaram a alterações espectrais em 496 nm e 573 nm, de tal forma que o valor médio das razões de reflectância nestes comprimentos de onda foi 0,40, sendo as medidas individuais assumidas para ser distribuído em uma função gaussiana em torno deste valor. Outras doenças para a razão R496/R573 apresentaram suas próprias razões de reflectância significativamente diferentes. A partir da Tabela 3, observa-se que há um efeito de fase (safra).

A Figura 3 mostra as distribuições gaussianas para as razões R443/R496 para 2017 e 2018, observando-se que para certas razões de comprimento de onda, as curvas de doenças se sobrepõem, efeito esperado, conforme a Figura 2. A análise da Figuras 3 permitiu derivar as faixas de valores de razões típicas para cada razão de comprimento de onda e doença. Esses intervalos para um desvio-padrão são apresentados na Tabela 4 para 2017 e 2018, expressando a magnitude das alterações espectrais derivadas de medições de reflectância direta em folhas de videira.

No entanto, pode-se observar que as faixas de 2017 são diferentes daquelas de 2018, indicando um efeito de safra que impacta as medidas de reflectância, e indicando que as faixas derivadas até este ponto não são úteis para os propósitos deste estudo, usando a radiometria para medições gerais de campo. Baseando-se nos resultados da análise discriminante, observou-se que as medidas sintomáticas estão associadas aos seus controles, sugerindo que uma forma de resolver essa dificuldade seria incluir uma calibra-

Tabela 3. Valores médios e desvios-padrão para as razões de reflectância selecionadas como marcadores de ação dos patógenos estudados, safra 2017. Letras diferentes após os valores médios indicam diferenças significativas entre as médias (α = 0,05) dos testes One-Way ANOVA e post-hoc de Tukey para comparações múltiplas. Conforme Pithan et al. (2021).

Razões	Míldio		Pé-preto		Doença de Petri		Oídio	
	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ	$\bar{x}$	σ
443/496	1,01	0,03	0,97	0,03	1,02	0,04	1,08	0,01
443/573	0,44	0,03	0,39	0,03	0,45	0,06	0,60	0,06
443/695	0,55	0,03	0,47	0,04	0,56	0,06	0,71	0,05
443/1900	0,61	0,03	0,56	0,05	0,52	0,02	0,56	0,05
496/573	0,44	0,02	0,40	0,02	0,44	0,04	0,56	0,05
496/695	0,54	0,02	0,49	0,04	0,55	0,03	0,66	0,04
516/1900	1,04	0,09	1,09	0,16	0,88	0,13	0,75	0,06
1900/2435	0,71	0,01	0,72	0,02	0,73	0,01	0,75	0,01

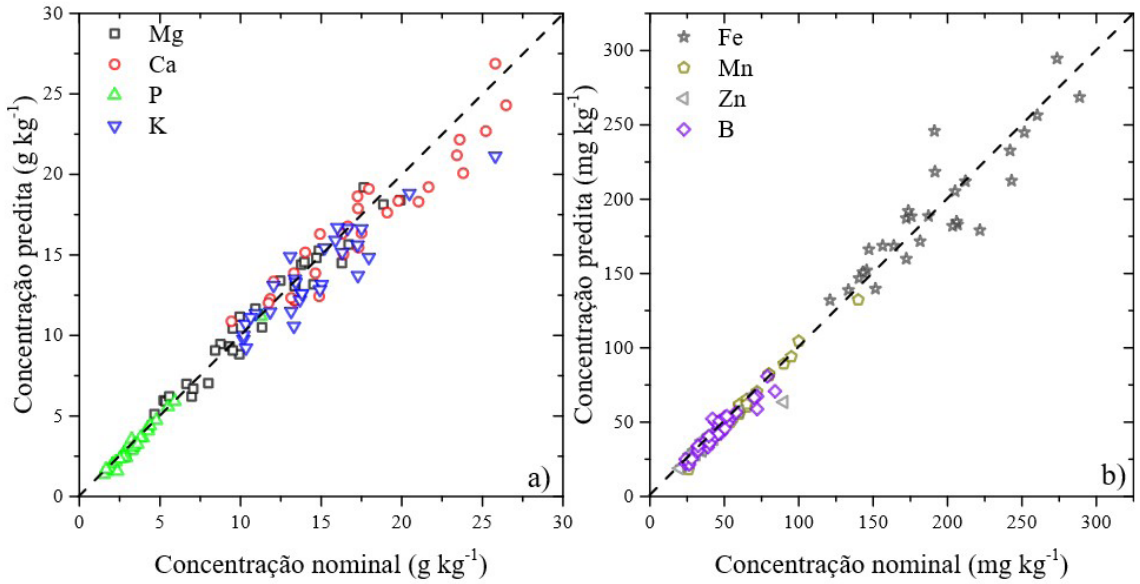


Figura 3. Distribuições gaussianas de razões de reflectância (razões de espectros) de doenças estudadas e controles para comprimentos de onda selecionados, temporada de 2017 e 2018. Os valores do eixo x são razões de reflectância adimensionais; os valores do eixo y são contagens; curvas têm áreas de 50 contagens. Conforme Pithan et al. (2021).

ção por dados de controle feitos na mesma estação. Testada a hipótese, para cada razão de comprimento de onda e ano, foram divididos os valores médios da Tabela 3 (para 2017) pelos seus respectivos valores de controle, o mesmo sendo feito para os dados de 2018.

Os quocientes derivados (limiares) são dados na Tabela 5; observando-se que os limiares para cada doença e razão de comprimento de onda tendem a se estabilizar de 2017 a 2018, sugerindo que o efeito sazonal foi compensado. Espera-se que os quocientes gerados seguindo esse raciocínio estejam próximos da unidade para plantas saudáveis. Quocientes diferentes da unidade poderiam ser indicadores de limiares sinalizando uma planta doente, pois, quanto mais longe da unidade, melhor indicador de uma planta doente. Esses resultados sugerem que, nesse delineamento experimental, os dados de plantas-controle sadias devem ser adquiridos juntamente com as medidas das plantas a serem monitoradas.

A Tabela 5 expressa o quanto o espectro de uma planta sintomática é alterado em relação ao espectro de uma planta saudável. Começando pela alteração expressa pela relação R443/R496, nota-se que a doença do pé-preto leva a uma alteração de cerca de 10%. Essa mesma doença, o pé-preto, também altera o espectro da relação R443/R573, mas em maior es-

Tabela 4. Faixas de razões de reflectância (± 1σ) para os comprimentos de onda indicados (nm) para 2017 e 2018. Conforme Pithan et al. (2021).

Razões de reflectância	Míldio	Pé-preto	Doença de Petri	Oídio
		Campanha 2017		
R443/R496	0.98–1.04	0.94–1.00	0.98–1.06	1.07–1.09
R443/R573	0.41–0.47	0.36–0.42	0.39–0.51	0.54–0.66
R443/R695	0.51–0.58	0.43–0.51	0.50–0.62	0.66–0.76
R443/R1900	0.58–0.64	0.51–0.61	0.50–0.54	0.51–0.61
R496/R573	0.42–0.46	0.38–0.42	0.40–0.48	0.51–0.61
R496/R695	0.52–0.56	0.45–0.53	0.52–0.58	0.62–0.70
R516/R1900	0.95–1.13	0.93–1.25	0.75–1.01	0.69–0.81
R1900/R2435	0.70–0.72	0.70–0.74	0.72–0.74	0.74–0.76
		Campanha 2018		
R443/R496	1.06–1.14	0.93–1.02	1.02–1.16	1.08–1.14
R443/R573	0.55–0.70	0.47–0.56	0.55–0.71	0.59–0.74
R443/R695	0.63–0.76	0.53–0.63	0.64–0.84	0.61–0.83
R443/R1900	0.59–0.69	0.49–0.59	0.59–0.85	0.54–0.75
R496/R573	0.51–0.62	0.46–0.55	0.51–0.61	0.48–0.66
R496/R695	0.59–0.68	0.54–0.64	0.61–0.72	0.57–0.74
R516/R1900	0.77–0.99	0.79–1.05	0.84–1.25	0.69–0.97
R1900/R2435	0.72–0.77	0.73–0.76	0.71–0.73	0.73–0.77

Tabela 5. Limiares para as doenças estudadas, derivados para cada ano (2017 e 2018), calibrados pelas medidas de controle adquiridas para cada estação. Conforme Pithan et al. (2021).

Razões de reflectância	Míldio		Pé-preto		Doença de Petri		Oídio	
	2017	2018	2017	2018	2017	2018	2017	2018
R443/R496	0.98	1.00	0.94	0.86	0.99	0.96	1.05	0.99
R443/R573	0.94	1.06	0.83	0.81	0.97	1.01	0.92	0.97
R443/R695	0.92	1.04	0.83	0.82	0.98	1.05	0.91	0.96
R443/R1900	1.00	0.86	1.02	0.93	0.94	1.20	0.95	1.16
R496/R573	0.95	1.05	0.88	0.92	0.97	1.04	0.95	0.96
R496/R695	0.94	1.04	0.88	0.96	0.99	1.08	0.94	0.98
R516/R1900	1.06	0.74	1.18	1.03	0.95	1.06	1.01	1.09
R1900/R2435	0.98	1.03	1.00	1.02	1.00	0.99	0.98	1.01

cala, até 17%; para esta relação, observa-se também uma mudança espectral sistemática para o oídio, mas em menor escala (3% a 5%). Essas duas doenças também foram observadas para a relação R443/R695, até cerca de 20% (pé-preto) e 5% a 8% (oídio). Para o míldio, a relação R443/R1900 pode ser um indicador útil, pois foram observadas alterações espectrais de até 14%. As relações R496/R573, R496/R695 e R516/R1900 são indicadores úteis de sintomas de pé-preto e oídio. A relação R1900/R2435 parece ser menos útil. Em alguns casos, a alteração espectral foi grande, mas muda de uma safra para outra, como na doença de Petri em R443/R1900 e também para o oídio nesta mesma proporção. O mesmo foi para Petri em R496/R695 e em R516/R1900 para míldio. O método, portanto, funciona melhor para a detecção de pé-pre-

to e oídio. Em certos casos, pode ser apropriado para míldio e doença de Petri se for observada uma alteração espectral; mesmo que a direção da alteração mude de ano para ano, uma mudança em si já pode indicar uma planta doente.

Este estudo apresentou um método alternativo em comparação com outros com objetivos semelhantes baseados em medidas hiperespectrais para diversas culturas, como os métodos e resultados para trigo relatados por Huang et al. (2015), e de Abdel-Rahman et al. (2014) em pinheiros. Da mesma forma, Lorenzen e Jensen (1989) relataram como folhas de cevada de genótipos quase isogênicos, inoculadas com *Blumeria graminis* f.sp. *hordei* diferiram em sua reflectância espectral ao longo do tempo, e Kuska et al. (2015) relataram que a assinatura espectral dos genótipos resistentes de cevada não apresentou alterações significativas ao longo do período experimental. Estudando folhas de beterraba, Rumpf et al. (2010) relataram uma investigação em que dados hiperespectrais dos patógenos *Cercospora beticola*, *Uromyces betae* ou *Erysiphe betae* causaram respectivamente Cercospora mancha foliar, ferrugem da beterraba e oídio, alcançando uma precisão de classificação entre 65% e 90%. No entanto, os comprimentos de onda específicos onde ocorrem mudanças espectrais e a magnitude das alterações ainda devem ser relatados.

Os coeficientes de correlação de Pearson e os valores de *p* entre clorofila total e reflectância nos oito comprimentos de onda selecionados são apresentados na Tabela 6 para míldio, pé-preto e doença de Petri, e a Tabela 7 apresenta resultados para oídio frente à clorofila a e clorofila b, conforme Pithan et al. (2021).

Tabela 6. Coeficientes de correlação de Pearson (*r*) e valores de *p* entre valores de clorofila total e reflectância de doenças. (1) míldio; (2) controle do míldio; (3) pé-preto; (4) doença de Petri; (5) controle do pé-preto e da doença de Petri. Apenas valores de *p* para correlações significativas são mostrados. Conforme Pithan et al. (2021).

Doença	1		2		3		4		5	
λ	*r*	*p*	*r*	*p*	*r*	*p*	*r*	*p*	*r*	*p*
443	-0.68	0.030	-0.63	0.050	-0.37		-0.57		-0.05	
496	-0.77	0.009	-0.79	0.007	-0.54		-0.70	0.024	-0.54	
516	-0.88	0.001	-0.82	0.004	-0.69	0.027	-0.76	0.011	-0.88	0.001
573	-0.90	0.000	-0.84	0.002	-0.67	0.034	-0.74	0.014	-0.91	0.000
695	-0.90	0.000	-0.73	0.017	-0.38		-0.77	0.009	-0.77	0.009
1420	-0.10		0.06		0.46		-0.13		0.14	
1900	-0.44		-0.19		0.23		0.05		0.03	
2435	-0.17		0.19		0.36		-0.10		0.09	

Tabela 7. Coeficientes de correlação de Pearson (*r*) e valores de *p* entre os valores de clorofila total (chl(a + b)), clorofila a (chl a), clorofila b (chl b) e reflectância do oídio (*powdery mildew*) e seu controle (*powdery mildew control*). Apenas valores de *p* para correlações significativas são mostrados. Conforme Pithan et al. (2021).

λ	Powdery mildew						Powdery mildew control					
	chl(a + b)		chl a		chl b		chl(a+b)		chl a		chl b	
	r	*p*	*r*	*p*	*r*	*p*	*r*	*p*	*r*	*p*	*r*	*p*
443	0.69	0.027	0.66	0.038	0.76	0.011	0.43		0.48		0.33	
496	0.63	0.050	0.60		0.70	0.024	0.05		0.10		-0.04	
516	0.13		0.16		0.05		-0.86	0.001	-0.84	0.002	-0.90	0.000
573	-0.02		0.01		-0.12		-0.93	0.000	-0.91	0.000	-0.95	0.000
695	0.14		0.16		0.06		-0.95	0.000	-0.94	0.000	-0.96	0.000
1420	0.08		0.10		0.01		-0.12		-0.11		-0.13	
1900	-0.17		-0.15		-0.24		-0.29		-0.27		-0.32	
2435	0.06		0.08		-0.01		-0.33		-0.32		-0.34	

Com base em Pithan et al. (2021), viu-se que o teor de clorofila foliar foi mais bem correlacionado com os comprimentos de onda mais curtos, até 695 nm; sugerindo que a partir de uma medição de clorofila é possível inferir o valor de reflectância em 443, 496, 516, 573 e 695 nm. Dada a disponibilidade de instrumentos de baixo custo como medidores de clorofila, estes poderiam ser utilizados num método para obter valores de reflectância necessários para a derivação dos limiares discutidos anteriormente.

4 CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo mostram que as infecções causadas pelos patógenos *P. viticola*, *U. necator*, D. *macrodidyma* e *Phaeoacremonium* ssp., após a inoculação em videiras jovens, quando os sintomas ainda estão em estágio inicial, induzem alterações na reflectância em regiões espectrais características. Plantas expostas a patógenos ativam respostas de defesa em estágios iniciais, quando sintomas visuais da folha não estão presentes, reagem à presença de um patógeno com mecanismos fisiológicos, como a redução da taxa de fotossíntese, que, ao mesmo tempo em que induz um aumento da fluorescência e emissão de calor (West et al., 2003), induzem mudanças na reflectância. O oídio, avaliado espectralmente num estágio de infecção mais avançado, apresentou uma curva espectral próxima à do estágio inicial, com diferença na região espectral em relação ao teor de água da planta. Entretanto, mesmo em diferentes estágios de infecção, os espectros de reflectância seguem um padrão semelhante, principalmente na região do visível.

Foi desenvolvida metodologia em condições controladas em laboratório, visando à detecção de algumas doenças fúngicas que afetam as videiras, baseada em medições de reflectância espectral de folhas de videira, a qual produziu um conjunto de valores relacionados à reflectância, na forma de limiares, que podem ser utilizados em medições gerais realizadas em campo. A detecção de uma doença, em qualquer caso, requer também a observação de plantas assintomáticas usadas como controle.

A aplicação dessa metodologia no contexto da agricultura de precisão revela um enorme potencial. A capacidade de detecção precoce de doenças por meio de sensores espectrais, integrados a sistemas de agricultura de precisão, pode transformar significativamente o manejo de vinhedos. Sensores instalados em drones ou dispositivos móveis podem realizar medições contínuas e em tempo real, fornecendo dados que permitem uma resposta rápida e precisa a surtos de doenças, minimizando o uso de fungicidas e otimizando os recursos.

O método tem potencial para o desenvolvimento de dispositivos para produzir dados em tempo real que podem ser processados automaticamente para dar, também em tempo real, um diagnóstico sobre o estado fitossanitário. Isso pode ser feito associando ao dispositivo de medição um processador capaz de realizar as operações básicas nos espectros observados. O dispositivo de observação em si não precisa ter a capacidade de observar completamente um espectro em alta resolução, já que a sensibilidade é necessária apenas em alguns comprimentos de onda predeterminados, um dispositivo fotossensível mais simples e barato pode ser projetado para realizar as medições, sintonizado com as doenças a serem detectadas.

No que diz respeito ao desenvolvimento de dispositivos para observação de campo em tempo real, os resultados sugerem que tais dispositivos devem ter sensibilidades espectrais do visível ao infravermelho próximo, valores limiares resultantes da observação de 443 nm estendendo-se a 1.900 nm e 2.435 nm. No entanto, é sabido que sensores sensíveis a esses comprimentos de onda tendem a ser mais caros e complexos de operar. O uso de sensores mais baratos com sensibilidades limitadas ao visível e até cerca de 1.000 nm, mesmo que reduzindo um pouco a precisão do método, ainda produziria resultados úteis.

A agricultura de precisão, ao incorporar essas tecnologias, não só facilita a detecção precoce e a resposta rápida a infecções, mas também promove práticas agrícolas mais sustentáveis e economicamente viáveis. A integração de sensores espectrais com sistemas de gestão de dados geoespaciais permite a criação de mapas detalhados de saúde das plantas, orientando a aplicação precisa de insumos e recursos. Isso, por sua vez, melhora a eficiência operacional e reduz os custos para os produtores, além de diminuir o impacto ambiental devido ao uso racional de pesticidas e fungicidas.

Como se pode deduzir dos resultados, o método desenvolvido neste estudo é amplamente exploratório, com foco num problema cuja solução é difícil de ser alcançada, pois as mudanças espectrais são pequenas e frequentemente se sobrepõem, os mesmos feitos em duas fases de observação, em que o estágio exato das doenças estudadas não pode ser avaliado com precisão. É possível que observações adicionais possam produzir indicadores mais precisos, ou preditores de doenças, uma vez que foram observados processos complexos de infestação de patógenos, a produção de indicadores precisos pode ser uma tare-

fa difícil. No entanto, se medições com alta precisão estiverem disponíveis, e nessa discussão sobre qualidade de dados sugere-se que seja o caso desses dados, tal desafio poderia ser mitigado.

Em resumo, a integração da espectroscopia de reflectância com a agricultura de precisão apresenta uma abordagem promissora para a gestão eficiente de doenças em vinhedos. Esta combinação de tecnologia e prática agrícola tem o potencial de transformar a viticultura, promovendo maior sustentabilidade, eficiência e rentabilidade.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às suas instituições. Os autores agradecem pelas bolsas da agência brasileira Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes).

REFERÊNCIAS

ABDEL-RAHMAN, E. M.; MUTANGA, O.; ADAM, E.; ISMAIL, R. Detecting sirex noctilio grey-attacked and lightning-struck pine trees using airborne hyperspectral data, random forest and support vector machines classifiers. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. *88*, p. 48-59, 2014. DOI: http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.11.013.

BEGHI, R.; GIOVENZANA, V.; BRANCADORO, L.; GUIDETTI, R. Rapid evaluation of grape phytosanitary status directly at the check point station entering the winery by using visible/ near infrared spectroscopy. **Journal of Food Engineering,** v. 204, p. 46-54, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.012.

CAMARGO, U. A.; PROTAS, J. F. S.; MELLO, L. M. R.. Grape growing and processing in Brazil. **Acta Horticulturae**, n. 785, p. 51-58, 2008. DOI: http://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.785.2.

DE BEI, R.; COZZOLINO, D.; SULLIVAN, W.; CYNKAR, W.; FUENTES, S.; DAMBERGS, R.; PECH, J.; TYERMAN, S. Non-destructive measurement of grapevine water potential using near infrared spectroscopy. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. *17*, n. 1, p. 62-71, 2011. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2010.00117.x.

DELALIEUX, S.; VAN AARDT, J.; KEULEMANS, W.; SCHREVENS, E.; COPPIN, P. Detection of biotic stress (Venturia Inaequalis) in apple trees using hyperspectral data: non-parametric statistical approaches and physiological implications. **European Journal of Agronomy**, v. *27*, n. 1, p. 130-143, 2007. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2007.02.005.

ETTABAA, K. S.; SALEM, M. B. Adaptive progressive band selection for dimensionality reduction in hyperspectral images. **Photonirvachak (Dehra Dun)**, v. *46*, n. 2, p. 157-167, 2018. DOI: http://doi.org/10.1007/s12524-017-0691-9.

FREIRE, L.; PASSAMANI, F. R. F.; THOMAS, A. B.; NASSUR, R. D. C. M. R.; SILVA, L. M.; PASCHOAL, F. N.; PEREIRA, G. E.; PRADO, G.; BATISTA, L. R. Influence of physical and chemical characteristics of wine grapes on the incidence of penicillium and aspergillus fungi in grapes and ochratoxin a in wines. **International Journal of Food Microbiology**, v. *241*, p. 181-190, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2016.10.027.

GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. **Science**, v. *327*, n. 5967, p. 828-831, 2010. DOI: http://doi.org/10.1126/science.1183899.

GRAEFF, S.; LINK, J.; CLAUPEIN, W. Identification of powdery mildew (Erysiphe Graminis Sp. Tritici) and take-all disease (Gaeumannomyces Graminis Sp. Tritici) in wheat (Triticuma Estivum L.) by means of leaf reflectance measurements. **Open Life Sciences**, v. *1*, n. 2, p. 275-288, 2006. DOI: http://doi.org/10.2478/s11535-006-0020-8.

HUANG, L. S.; JU, S. C.; ZHAO, J. L.; ZHANG, D.; HONG, Q.; TENG, L.; YANG, F.; ZUO, Y. Hyperspectral measurements for estimating vertical infection of yellow rust on winter wheat plant. **International Journal of Agriculture and Biology**, v. *17*, n. 6, p. 6, 2015. DOI: http://doi.org/10.17957/IJAB/15.0034.

JACKSON, R. S. **Wine science***: principles and applications. 3rd ed.* Cambridge: Academic Press, 2008. DOI: http://doi.org/10.1016/B978-012373646-8.50007-X.

JACKSON, R. S. **Viticulture**. Reference Module in Food Science, p. 14. 2016. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.02871-7

JUNGES, A. H.; DUCATI, J. R.; LAMPUGNANI, C. S.; ALMANÇA, M. A. K. Detection of grapevine leaf stripe disease symptoms by hyperspectral sensor. **Phytopathologia Mediterranea**, v. *57*, p. 399-406, 2018. DOI: http://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-22862.

KELLER, M. **The science of grapevines**. 3rd ed. Cambridge: Academic Press, 2020.

KOMÁREK, M.; ČADKOVÁ, E.; CHRASTNÝ, V.; BORDAS, F.; BOLLINGER, J.. Contamination of vineyard soils with fungicides: a review of environmental and toxicological aspects. **Environment International**, v. *36*, n. 1, p. 138-151, 2010. DOI: http://doi.org/10.1016/j.envint.2009.10.005.

KUSKA, M.; WAHABZADA, M.; LEUCKER, M.; DEHNE, H. W.; KERSTING, K.; OERKE, E. C.; STEINER, U.; MAHLEIN, A. K. Hyperspectral phenotyping on microscopic scale – towards automated characterization of plant-pathogen interaction. **Plant Methods**, v. *11*, n. 28, p. 1-14, 2015. DOI: http://doi.org/10.1186/s13007-015-0073-7.

LORENTE, D.; ESCANDELL-MONTERO, P.; CUBERO, S.; GÓMEZ-SANCHÍS, J.; BLASCO, J. Visible–NIR reflectance spectroscopy and manifold learning methods applied to the detection of fungal infections on citrus fruit. **Journal of Food Engineering**, v. *163*, p. 17-24, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.04.010.

LORENZEN, B.; JENSEN, A. Changes in leaf spectral properties induced in barley by cereal powdery mildew. **Remote**

Sensing of Environment, v. *27*, n. 2, p. 201-209, 1989. DOI: http://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90018-7.

MAHLEIN, A. Plant disease detection by imaging sensors – parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. **Plant Disease**, v. *100*, n. 2, p. 241-251, 2016. DOI: http://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340-FE.

MALVERN PANALYTICAL. **ASD FieldSpec 4 Standard-Res Spectroradiometer**. 2020. Disponível em: https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/asd-range. Acesso em: 22 dez. 2020.

NAIDU, R. A.; PERRY, E. M.; PIERCE, F. J.; MEKURIA, T. The potential of spectral reflectance technique for the detection of grapevine leafroll-associated virus in two red-berried wine grape cultivars. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *66*, n. 1, p. 38-45, 2009. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2008.11.007.

PERTOT, I.; CAFFI, T.; ROSSI, V.; MUGNAI, L.; HOFFMANN, C.; GRANDO, M.S.; GARY, C.; LAFOND, D.; DUSO, C.; THIERY, D.; MAZZONI, V.; ANFORA, G. A critical review of plant protection tools for reducing pesticide use on grapevine and new perspectives for the implementation of IPM in viticulture. **Crop Protection (Guildford, Surrey)**, v. *97*, p. 70-84, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.11.025.

PITHAN, P. A.; DUCATI, J. R.; GARRIDO, L. R.; ARRUDA, D. C.; THUM, A. B.; HOFF, R. Spectral characterization of fungal diseases downy mildew, powdery mildew, black-foot and Petri disease on Vitisvinifera leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. *42*, n. 15, p. 5680-5697, 2021. DOI: http://doi.org/10.1080/01431161.2021.1929542.

RUMPF, T.; MAHLEIN, A. K.; STEINER, U.; OERKE, E. C.; DEHNE, H. W.; PLÜMER, L. Early detection and classification of plant diseases with support vector machines based on hyperspectral reflectance. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *74*, n. 1, p. 91-99, 2010. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2010.06.009.

SANKARAN, S.; MISHRA, A.; EHSANI, R.;DAVIS, C. A review of advanced techniques for detecting plant diseases. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *72*, n. 1, p. 1-13, 2010. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2010.02.007.

SCHROEDER, D. J. **Astronomical Optics.** Cambridge: Academic Press, 1999.

WEST, J. S.; BRAVO, C.; OBERTI, R.; LEMAIRE, D.; MOSHOU, D.; MCCARTNEY, H.A. The potential of optical canopy measurement for targeted control of field crop diseases. **Annual Review of Phytopathology**, v. *41*, n. 1, p. 593-614, 2003. DOI: http://doi.org/10.1146/annurev.phyto.41.121702.103726.

28

Calibração de condutivímetro de solo para zoneamento de disponibilidade de água em Latossolo Bruno

Soil conductivity meter calibration for zoning of water availability in Latosolo Bruno

Luciano Gebler[1], David José Miquelutti[2], Josieli Aparecida Fortuna[3], Mateus Foscarin Montanari[4], Diego Silva Fortuna[5], Rodrigo Moreira Hoffmann[6]

[1] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br*
[2] *Professor, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages (SC), Brasil, david.miquelluti@udesc.br*
[3] *Engenheira Agrônoma, Vacaria (RS), Brasil, josieli@chapadagraos.com.br*
[4] *Engenheiro Agrônomo, Autônomo, Vacaria (RS), Brasil, Mateusfoscarin.agro@gmail.com*
[5] *Engenheiro Agrônomo, Vacaria (RS), Brasil, ds1.fortun@gmail.com*
[6] *Engenheiro Agrônomo, Lagoa Vermelha (RS), Brasil, rodrigo_moreirahb@hotmail.com*

RESUMO

A definição das zonas de manejo tem sido um grande desafio enfrentado pela agricultura de precisão. Dentro dessa premissa se encontra o gerenciamento de água disponível às plantas, dada a importância que ela representa como maior limitante para o seu desenvolvimento. Dentre as possíveis ferramentas de apoio a esta avaliação, encontram-se métodos indiretos, sendo o uso da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) um dos principais utilizados pela agricultura de precisão. Entretanto, como o método fornece uma leitura indireta da situação do ambiente, tem havido problemas de significância de seus resultados, com pouca compreensão por parte dos técnicos sobre os mapas gerados. Uma vez que a CEa tem correlação alta com a textura do solo, principalmente argila, salinidade e disponibilidade hídrica, foi possível estabelecer uma condição onde o único fator variante seria a disponibilidade de água no solo, permitindo a geração de curvas que representassem a situação do estoque de água no perfil com base na informação da CEa. O objetivo deste trabalho foi gerar um método de calibração da condutividade elétrica aparente do solo na determinação de classes de umidade, pensando em diferentes regiões e tipos de solo característicos. Foram utilizadas duas áreas cobertas de 220 m2, isolando a entrada de água externa antes e durante o experimento, situadas em duas propriedades rurais sobre Latossolo Bruno, característico da região de Vacaria/RS, permitindo avaliar o comportamento do experimento em dois diferentes níveis de argila no solo, 35% e 66%. Cada uma das estruturas foi dividida internamente em quatro parcelas de 5,0 x 5,0 m consideradas áreas-tampão, com um quadrado de um m2 centralizado onde seria feito o aporte de água e medição da condutividade. O teste consistiu no monitoramento semanal da condutividade elétrica, com leituras aos 0,2 m e 0,4 m de profundidade, 48 horas após os tratamentos receberem água em doses controladas, 0, 15, 25 e 35 mm, com periodicidade semanal ao longo de um ano. Com base nos resultados obtidos, foi possível gerar uma escala de valores delimitando níveis diferentes de disponibilidade hídrica para os Latossolos Brunos da região de Vacaria/RS, permitindo a geração de mapas de manejo para o manejo da água com base na CEa para essa região.

Palavras-chave: zoneamento de potencial produtivo; água no solo; física do solo; manejo do solo.

ABSTRACT

Defining management zones has been a major challenge faced by Precision Agriculture (PA). This includes the management of water availability for plants, given its importance as a major limiting factor for plant development. Indirect methods are among the possible tools to undertake this evaluation, with the use of apparent electrical conductivity (ECa) of the soil by PA being one of the main ones. However, while the method provides an indirect reading of environmental conditions, there have been problems regarding the significance of its results, with little understanding on the part of technicians about the generated maps. Since ECa has a high correlation with soil texture, mainly clay, salinity and water availability, it was possible to establish a situation wherein the only

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000079

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

variable factor would be soil water availability, allowing the generation of curves that represent the condition of the water stock in the profile based on ECa information. The aim of this study was to generate a method for calibrating the apparent electrical conductivity of the soil in the determination of water availability classes, considering different regions and soil type characteristics. Two covered areas of 220m2 were used, isolating the entrance of external water before and during the experiment, located in two rural properties on Latosol Bruno, characteristic of the region of Vacaria, RS, allowing an evaluation of the behavior of the experiment at two different levels of clay in the soil, 35 and 66%. Each of the structures was internally divided into 4 plots measuring 5.0 x 5.0 meters, considered buffer areas, with a centralized 1 m2 area where the water supply and conductivity measurement could be made. The test consisted of weekly monitoring of electrical conductivity, with readings at 0.2m and 0.4m depth, 48 hours after the treatments received water in controlled doses of 0mm, 15mm, 25mm, 35mm, weekly over a year. Based on the results obtained, it was possible to generate a scale of values outlining different water availability levels for the Latosolos Brunos in the region of Vacaria, RS, allowing the generation of management maps for water availability based on ECa for this region.

Keywords: productive potential zoning; soil water; soil physics; soil management.

1 INTRODUÇÃO

O uso da condutividade elétrica aparente (CEa) tem diferentes níveis de aplicação, mas à medida que se busca um uso mais cotidiano, o foco passa a ser no usuário final e em suas aplicações de campo. Atualmente, neste contexto, o grande cliente da CEa tem sido a agricultura de precisão (AP) (Türker et al., 2011). A mensuração em áreas de pomares e vinhedos tem adotado preferencialmente dois tipos de equipamentos, sendo o sensor de contato com o solo utilizado normalmente antes da instalação de pomares e vinhedos (Figura 1) ou o sensor proximal sem contato direto com o solo, após a existência de plantas no local, evitando afetar as raízes (Figura 2).

O uso da condutividade elétrica em solo como ferramenta de campo da agricultura de precisão para explicar os fenômenos derivados da relação solo, planta, ambiente passou a ser corriqueiro, e até necessário. Bramley e Trengove (2013) reforçam que no caso da Austrália, um dos locais de início da fruticultura de precisão, a CEa foi utilizada com grande ênfase no processo de zoneamento da variabilidade espacial como base do planejamento, aplicada como ferramenta basilar em qualquer área onde será implantada uma cultura agrícola, inclusive as perenes, e que a partir daí todo o ambiente é manejado segundo este estudo da variabilidade.

Isso também pode ser visto em Bramley et al. (2011), em um vinhedo na Nova Zelândia, buscando a utilização da CEa como indicador de produtividade, utilizando o cruzamento de várias informações de solo e planta no zoneamento do ambiente produtivo, porém sem o mesmo sucesso alcançado em pesquisas anteriores na Austrália. Ao longo do tempo, esta aplicação vem sendo replicada em outros países como nos Estados Unidos da América (Rodríguez-Pérez et al., 2011), no Chile (Ortega-Blu; Molina-Roco, 2016), ou na Espanha (Mirás-Avalos et al., 2020), também em vinhedos (Fulton et al., 2011), manejando vinhedos e pomares na Califórnia.

Outra aplicação, ainda que fortemente vinculada com a agricultura de precisão, é o uso da CEa no planejamento da irrigação das áreas agrícolas e na gestão dos recursos hídricos do solo. Isto é corroborado por

Figura 1. Equipamento comercial de medição da condutividade elétrica aparente do solo por contato.
Fonte: Arnó et al., 2017.

Figura 2. Equipamento de medição da condutividade elétrica aparente do solo sem contato com o solo: 1 - utilizando trenó arrastado contendo a) trenó com o sensor, b) veículo para arraste, c) antena de GPS (Pedrera-Parrilla, et al., 2016); 2 - manejo manual em pomares estabelecidos (Türker et al., 2011).

diversos autores, seja avaliando o mapeamento do estresse hídrico das plantas, seja em relação ao potencial hídrico do solo ou seu balanço hídrico. Tais estudos também têm relação com os locais onde a disponibilidade de água para pomares é crítica, sendo que os principais resultados ocorreram na Califórnia, em pomares de amêndoas e videiras (Fulton et al., 2011; Rodríguez-Pérez et al., 2011; Yu; Kurtural, 2020; Yu et al., 2021), oliveira na Espanha (Pedrera- Parrilla et al., 2017) e macieira na Grécia (Tsoulias et al., 2020). Dada a característica das plantas perenes, em gradativamente estabelecerem uma zona de fornecimento de água ocupando um grande volume do solo com suas raízes, tanto em circunferência quanto em profundidade, foi necessário avaliar seu impacto na resposta da CEa a fim de estabelecer a forma correta de sua utilização em pomares formados, como nos trabalhos de Tsoulias et al. (2020) e Martínez et al. (2021).

Pedrera-Parrilla et al. (2016), Ortega-Blu e Molina-Roco (2016), Uribeetxebarria et al. (2018a) e Mirás-Avalos et al. (2020), trabalhando respectivamente em pomares de oliveiras na Espanha, videiras no Chile, pessegueiros e videiras na Espanha, constataram que na fruticultura existe ainda uma forte vinculação entre a condutividade elétrica aparente, a água e a textura do solo, mas em alguns casos estabeleceram a ressalva de que nem sempre essa relação é direta e deve ser adequada para cada situação (Ortega-Blu; Molina-Roco, 2016; Uribeetxebarria et al., 2018a).

O problema do estabelecimento de uma relação entre os valores obtidos do uso da CEa e as respostas do mundo real tem gerado uma série de ressalvas a diversos trabalhos ao longo dos anos. A questão da significância entre a transformação de valores obtidos de uma escala condutância elétrica (miliSiemens) por uma área (em centímetros ou metros quadrados), gerando respostas físicas como concentração de água, nutrientes, crescimento de plantas, produtividade ou áreas de compactação no solo levaram a estudos da aplicação da CEa de maneira tridimensional, em camadas, buscando estabelecer melhores relações.

Käthner e Zude-Sasse (2015) apresentaram trabalhos nessa linha, em pomares de ameixa na Alemanha, obtendo altos valores de correlação entre o uso da condutividade elétrica e a predição do desenvolvimento das plantas considerando as diversas camadas do solo. Além disso, Uribeetxebarria et al. (2018a) também avaliaram o uso da CEa aplicado em camadas para a detecção de zonas de impedimento à passagem de raízes e à irrigação em trabalhos em um pomar de pêssegos em Leida, Espanha, implantado em um solo Petrocálcico típico das regiões semiáridas do mediterrâneo. Seus resultados reforçaram que apesar de haver resposta da CEa para diferentes zonas com a existência ou não de impedimento por camadas endurecidas de CaCO3 no solo, é necessário estudar a variabilidade temporal em conjunto com a espacial para se obter um zoneamento de alta resolução nesses ambientes, incluindo as zonas com maior presença de matéria orgânica nesses solos.

Mesmo que no passado tenha havido algumas tentativas de vincular o uso da ECa à fertilidade do solo, como nos trabalhos de Serrano et al. (2017) em Portugal, gradualmente o interesse internacional do uso da condutividade elétrica aparente do solo aplicado às frutíferas parece estar migrando em direções alternativas como apoio ao manejo do solo para implantação de pomares (Taguas et al., 2017; Uribeetxebarria et al., 2018b), ou mesmo como ferramenta de apoio no manejo das culturas, principalmente em relação à sua vinculação à quantidade e qualidade da produção, sempre vinculado à agricultura de precisão (Türker et al., 2011; Arnó et al., 2017; Uribeetxebarria et al., 2019).

Mesmo com todas essas novas formas de utilização da CEa sendo testadas, ainda não houve um consenso quanto ao seu uso, exceto no caso das aplicações tradicionais, bem consolidadas, para delimitação

da salinidade, umidade no solo ou textura. Ainda assim, a condutividade elétrica aparente do solo não deve ser utilizada de maneira isolada, mesmo que planejada somente como ferramenta para intervenção dos parâmetros físico-químicos e hidrológicos do solo. Entretanto, o fator significância dos resultados numéricos e sua relação com a resposta do ambiente deve ser melhorada, pois, ao gerar uma resposta indireta, muitos técnicos não entendem a importância de sua aplicação. Sendo assim, este trabalho buscou vincular de forma prática para uma região e solo específico no Sul do Brasil os valores obtidos pelo condutivímetro e a resposta em valores de disponibilidade de água no solo, neste caso específico, um Latossolo Bruno da região de Vacaria/RS.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Uma vez que a CEa apresenta uma complexa associação com os fatores ambientais inter-relacionados, sempre houve certa dificuldade na correlação entre a leitura direta numérica do equipamento com parâmetros reais. Mesmo havendo uma relação bem conhecida da CEa e a textura do solo, a salinidade e a presença de água, há demanda de uma aproximação que traduza esses valores lineares para escalas manuseáveis no campo, ampliando seu uso de uma escala pontual para uma escala regional.

Apesar da CEa proporcionar um método indireto simples, eficaz e rápido, capaz de gerar informações em tempo real nas medições de campo, os dados gerados pelas medições de campo sempre foram na forma de uma resposta linear (zero a mais infinito), permitindo múltiplas interpretações para os usuários de campo, que muitas vezes, lançavam mão de métodos automatizados dos softwares de geoprocessamento para a geração de mapas de zonas de manejo do solo baseados na CEa. Isso acabava por gerar erros analíticos e operacionais entre a mensuração e os relatórios para interpretação.

Ao se buscar uma solução para esse tipo de problema, sabendo-se que a salinidade do solo não afeta a região produtora de maçãs no Sul do Brasil, e sabendo que o tipo de solo tem um gradiente de textura possível de ser fixado como constante, buscou-se estabelecer o comportamento da CEa como ferramenta para o zoneamento da disponibilidade da umidade em um tipo específico de solo predominante na principal região produtora (Vacaria/RS), estudando como ela se comportaria em relação à CEa em duas diferentes propriedades na região. Ressalta-se que essa solução deve ser replicada para quaisquer condições diferentes dos limites aqui estabelecidos a fim de validar ou estabelecer novos valores de referência, ampliando-se as opções de resposta à textura, independentemente das culturas existentes.

Para o estabelecimento dos limites da curva de calibração, foram utilizadas duas estruturas protegidas com cobertura plástica na forma de estufas, com dimensões de 20,0 m x 11,0 m, em um ambiente de solo homogêneo na região (Latossolo Bruno), mantido permanentemente desnudo, considerando somente a evaporação do mesmo, variando somente os percentuais de argila, uma estabelecida como limite inferior de argila na composição do solo, com 35%, e a outra, seu limite superior, com 66%. O solo de ambas as áreas foi coletado e analisado para a textura nos laboratórios da Embrapa Instrumentação, em São Carlos/SP, confirmando esses teores.

Nessas estruturas foram delimitados quatro quadros de 25 m2 (5,0 m x 5,0 m), como zona-tampão, onde no centro havia um quadro de 1,0 m2, como receptor de água, havendo uma replicata desse conjunto por estufa. A única variação nas parcelas foi o fornecimento de água, feito semanalmente em quatro doses distintas: 0 mm (situação de seca extrema), 15 mm (déficit hídrico forte), 25 mm (déficit hídrico moderado) e 35 mm (distribuição igualitária da média de chuva anual da região, em torno de 1.800 mm de chuva anuais), conforme a Figura 3.

Semanalmente, 48 horas depois do fornecimento de água, era feita a medição da condutividade elétrica aparente do solo com 10 repetições nas zonas centrais de cada quadrado, avaliando-se o comportamento em relação à água recebida e presente no solo (Figura 4).

O equipamento utilizado para a medição da condutividade elétrica foi o modelo desenvolvido pela

Figura 3. Estrutura preparada para estabelecimento da CEa em Latossolo Bruno para a região de Vacaria/RS, podendo ser observadas as duas fileiras de replicatas e na fila da esquerda as parcelas de 15, 25 e 35 mm de fornecimento semanal de água.
Foto: Autores.

Figura 4. Processo de molhamento das áreas e medição da condutividade elétrica aparente 48 horas após o molhamento.
Foto: Autores.

Embrapa Instrumentação (Rabello et al., 2010), já havendo similares nacionais em comercialização. Para confirmar essas diferenças, foi instalada uma série de tensiômetros fora das áreas-tampão e que receberam as mesmas doses de água nos mesmos momentos que as parcelas experimentais.

Os tensiômetros demonstraram o mesmo comportamento esperado que foi previsto para o sistema sob leitura da CEa, porém os tensiômetros de 0, 15 e 25 mm foram "estourando" à medida que o experimento avançava, demonstrando a tensão extrema do solo por falta de água. Isso também ajudou a demonstrar que o uso da CEa para estimação da disponibilidade de água no solo pode ser útil em relação a métodos tradicionais, em momentos em que o mesmo está extremamente seco, desde que devidamente calibrado para as condições locais.

Os dados foram testados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk, quanto à homogeneidade de variância pelo teste de Levene e quanto à presença de autocorrelação nos resíduos pelo teste de Durbin-Watson.

Ajustou-se um modelo de regressão linear aos dados de condutividade em função da umidade do solo (mm/mS^{-1}) utilizando-se o método dos mínimos quadrados ponderados, devido à presença de heterocedasticidade dos erros (Hoffmann, 2016). A seguir, obtiveram-se os intervalos de previsibilidade (Linf e Lsup) da condutividade elétrica para os valores de umidade de 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 mm/sem (Hoffmann, 2016). Em todas as análises foi adotado um nível de probabilidade de erro de 5%.

Tabela 1. Estimativas dos parâmetros do modelo ajustado (B0 é o intercepto/coeficiente linear e B1 o coeficiente de regressão/angular), erros padrões e coeficiente de determinação do modelo de regressão linear da condutividade elétrica (mS/cm^2) em relação aos teores de umidade do solo (mm/sem).

	Estimativa	Erro padrão
B0	0,4098	0,0338
B1	0,4278	0,0054
R2 ajustado	0,76	

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo ajustado produziu o seguinte gráfico que correlaciona o fornecimento de água e a condutividade elétrica ao longo do tempo (Figura 5).

Utilizando a média dos dados obtidos nas duas áreas avaliadas, considerando-as como os limites de argila do Latossolo na região, os resultados de condutividade elétrica variaram de 0,007 a 33,5 mS/cm^2, com um valor médio de 8,77 mS/cm^2 (erro padrão 0,160 mS/cm^2) e mediana de 8,95 mS/cm^2. As estimativas dos parâmetros do modelo ajustado assim como os respectivos erros de estimativas do modelo linear ajustado podem ser observadas na Tabela 1.

A seguir, obtiveram-se os intervalos de previsibilidade (Linf e Lsup) da condutividade elétrica para os valores de umidade de 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 mm/sem (Hoffmann, 2016). Em todas as análises foi adotado um nível de probabilidade de erro de 5%.

Assim, foi possível o estabelecimento de três classes de uso da CEa para delimitação de zonas de ma-

Tabela 2. Valores estimados e limites de previsão da condutividade elétrica do solo em relação aos teores de umidade de um Latossolo Bruno na região de Vacaria/RS, 48 horas após uma irrigação.

Estratos de umidade no solo	Fornecimento de água ao solo por m² (mm/sem)	CEest. (mS/cm²)	DP (mS/cm²)	Intervalo de previsão (mS/cm²)	
				LI	LS
SS	5	2,549	1,015026	0,56	4,538
	10	4,688	1,014987	2,699	6,677
PD	15	6,827	1,014965	4,838	8,817
	20	8,966	1,014961	6,977	10,956
	25	11,105	1,014974	9,116	13,095
DO	30	13,245	1,015004	11,255	15,234
	35	15,384	1,015052	13,394	17,373

CEest.: condutividade elétrica estimada; DP: desvio padrão; LI: limite inferior; LS: limite superior; SS: solo seco; PD: pouca disponibilidade; DO: disponibilidade ótima.

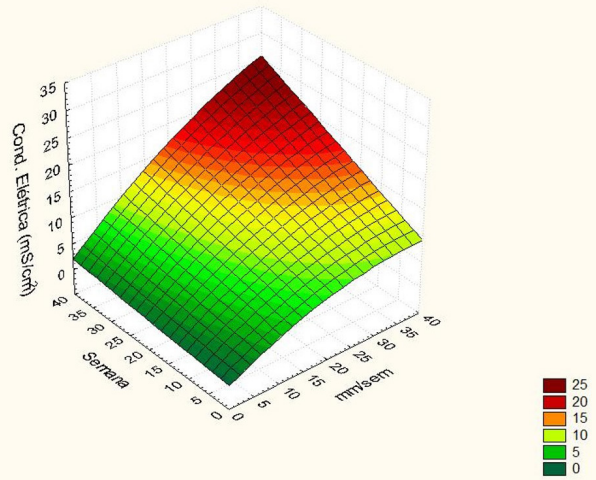


Figura 5. Gráfico do ajuste dos dados correlacionados entre fornecimento de água em mm/semanais e condutividade elétrica ao longo das semanas do experimento.
Fonte: Autores.

nejo segundo a disponibilidade de água em Latossolo Bruno na região de Vacaria/RS (Tabela 2), gerando significância para os valores brutos em miliSiemens (mS) gerados pelo condutivímetro de solo em operação no campo.

A partir dos resultados obtidos nas duas áreas experimentais, é possível a ressignificação dos valores de condutividade elétrica aparente obtidos em Latossolos Brunos na região de Vacaria/RS, indicando as regiões do solo em que pode haver maior ou menor disponibilidade hídrica para as culturas. Para tal, é necessário que seja feita uma leitura com condutivímetro de solo em torno de 48 horas após uma chuva, e o mapa gerado permitirá indicar as regiões com disponibilidade maior, menor ou solo seco. Isso pode auxiliar na explicação de eventuais variações de potenciais produtivos, ao cruzar estes resultados com dados de produção posteriormente.

4 CONCLUSÕES

Com a disponibilização desses limites de previsão de correlação entre CEa e umidade de solo para o Latossolo Bruno na região de Vacaria/RS, passa a ser possível a construção de mapas de disponibilidade hídrica em solos gerados a partir da CEa, permitindo que o tomador de decisão projete sistemas de irrigação ou altere a programação do manejo de plantas segundo as condições apresentadas pelo solo sem a necessidade de implantação de uma rede de tensiômetros, bastando o monitoramento pontual das zonas homogêneas de manejo.

Com o uso da metodologia sugerida, é possível o estabelecimento de mapas homogêneos de previsão do comportamento de umidade no solo após a ocorrência de uma chuva, permitindo ao produtor conhecer a variabilidade da disponibilidade hídrica no solo em tempo real, pela leitura da CEa, possibilitando melhor planejamento dos estoques de água do solo e a decisão de se implantar, usar ou não irrigação das áreas. Além disso, permitirá a coleta de dados temporais da disponibilidade hídrica das áreas, permitindo o melhor enfrentamento de secas recorrentes na região.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa, Sr. Olavo Amaro Caieron, e à Universidade de Caxias do Sul, na disponibilização de áreas e estruturas para a execução dos experimentos.

REFERÊNCIAS

ARNÓ, J.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A.; URIBEETXEBARRIA, A.; ESCOLÀ, A.; ROSELL-POLO, J. R. Comparing efficiency of different sampling schemes to estimate yield and quality parameters in fruit orchards. **Advances in Animal Biosciences**, v. 8, n. 2, p. 471-476, 2017. DOI: http://doi.org/10.1017/S2040470017000978.

BRAMLEY, R. G. V.; TROUGHT, M. C. T.; PRAAT, J. P. Vineyard variability in Marlborough, New Zealand: characterizing variation in vineyard performance and options for the implementation of Precision Viticulture. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. 17, n. 1, p. 83-89, 2011. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2010.00119.x.

BRAMLEY, R.; TRENGOVE, S. Precision Agriculture in Australia: present status and recent developments. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 3, p. 575-588, 2013. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-69162013000300014.

FULTON, A.; SCHWANKL, L.; LYNN, K. LAMPINEN, B.; EDSTROM, J.; PRICHARD, T. Using EM and VERIS technology to assess land suitability for orchard and vineyard development. **Irrigation Science**, v. 29, n. 6, p. 497-512, 2011. DOI: http://doi.org/10.1007/s00271-010-0253-1.

HOFFMANN, R. **Análise de regressão:** uma introdução à econometria. 5. ed. Piracicaba: O Autor, 2016. 404 p. Recurso eletrônico. Disponível em: https://www.esalq.usp.br/biblioteca/sites/default/files/Analise_Regress%C3%A3o.pdf. Acesso em: 15 dez. 2021.

KÄTHNER, J.; ZUDE-SASSE, M. Interaction of 3D soil electrical conductivity and generative growth in Prunus domestica L. **European Journal of Horticultural Science**, v. 80, n. 5, p. 231-239, 2015. DOI: http://doi.org/10.17660/eJHS.2015/80.5.5.

MARTÍNEZ, G.; LAGUNA, A. M.; GIRÁLDEZ, J. V.; VANDERLINDEN, K. Concurrent variability of soil moisture and apparent electrical conductivity in the proximity of olive trees. **Agricultural Water Management**, v. 245, p. 106652, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106652.

MIRÁS-AVALOS, J. M.; FANDIÑO, M.; REY, B. J.; DAFONTE, J.; CANCELA, J. J. Zoning of a newly-planted vineyard: spatial variability of physico-chemical soil properties. **Soil Systems**, v. 4, n. 4, p. 62, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/soilsystems4040062.

ORTEGA-BLU, R.; MOLINA-ROCO, M. Evaluation of vegetation indices and apparent soil electrical conductivity for site-specific vineyard management in Chile. **Precision Agriculture**, v. 17, n. 4, p. 434-450, 2016. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-016-9429-x.

PEDRERA-PARRILLA, A.; VAN DE VIJVER, E.; VAN MEIRVENNE, M.; ESPEJO-PÉREZ, A. J.; GIRÁLDEZ, J. V.; VANDERLINDEN, K. Apparent electrical conductivity measurements in an olive orchard under wet and dry soil conditions: significance for clay and soil water content mapping. **Precision Agriculture**, v. 17, p. 531-545, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/s11119-016-9435-z.

PEDRERA-PARILLA, A.; PACHEPSKY, Y.; TAGUAS, E.V.; MARTOS-ROSILLO, S.; VANDERLINDEN, K. Concurrent temporal stability of the apparent electrical conductivity and soil water content. **Journal of Hydrology**, v. 544, p. 319-326, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.10.017.

RABELLO, L. M.; INAMASSU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C. **Sistema de medida de condutividade elétrica do solo**. São Carlos: Embrapa, 2010. 8 p. (Série Documentos. Circular Técnica, 54). Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/77124/1/CiT54-2010.pdf. Acesso em: 15 dez. 2021.

RODRÍGUEZ-PÉREZ, J. R., PLANT, R. E., LAMBERT, J. J. SMART, D. R. Using apparent soil electrical conductivity (ECa) to characterize vineyard soils of high clay content. **Precision Agriculture**, v. 12, n. 6, p. 775-794, 2011. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-011-9220-y.

SERRANO, J.; SILVA, J. M.; SHAHIDIAN, S.; SILVA, L. L.; SOUSA, A.; BAPTISTA, F. Differential vineyard fertilizer management based on nutrient's spatio-temporal variability. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, n. 1, p. 46-61, 2017. DOI: http://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000004.

TAGUAS, E. V.; VANDERLINDEN, K.; PEDRERA-PARRILLA, A.; GIRÁLDEZ, J. V.; GÓMEZ, J. A. Spatial and temporal variability of spontaneous grass cover and its influence on sediment losses in an extensive olive orchard catchment. **Catena**, v. 157, p. 58-66, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.017.

TSOULIAS, N.; GEBBERS, R.; ZUDE-SASSE, M. Using data on soil ECa, soil water properties, and response of tree root system for spatial water balancing in an apple orchard. **Precision Agriculture**, v. 21, n. 3, p. 522-548, 2020. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-019-09680-8.

TÜRKER, U.; TALEBPOUR, B.; YEGÜL, U. Determination of the relationship between apparent soil electrical conductivity with pomological properties and yield in different apple varieties. **Žemdirbystė=Agriculture**, 2011, v. 98, n. 3, p. 307-314.

URIBEETXEBARRIA, A.; ARNÓ, J.; ESCOLÀ, A.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A. Apparent electrical conductivity and multivariate analysis of soil properties to assess soil constraints in orchards affected by previous parceling. **Geoderma**, v. 319, p. 185-193, 2018a. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.01.008.

URIBEETXEBARRIA, A.; DANIELE, E.; ESCOLÀ, A.; ARNÓ, J.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A. Spatial variability in orchards after land transformation: consequences for precision agriculture practices. **The Science of the Total Environment**, v. 635, p. 343-352, 2018b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.153.

URIBEETXEBARRIA, A.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A.; ESCOLÀ, A.; ROSELL-POLO, J. R.; ARNÓ, J. Stratified sampling in fruit orchards using cluster-based ancillary information maps: a comparative analysis to improve yield and quality estimates. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 2, p. 179-192, 2019. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-018-9619-9.

YU, R.; ZACCARIA, D.; KISEKKA, I.; KURTURAL, S. K. Soil apparent electrical conductivity and must carbon isotope ratio provide indication of plant water status in wine grape vineyards. **Precision Agriculture**, v. 22, p. 1333-1352, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s11119-021-09787-x.

YU, R.; KURTURAL, S. K. Proximal sensing of soil electrical conductivity provides a link to soil-plant water relationships and supports the identification of plant water status zones in Vineyards. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 244, 2020. DOI: http://doi.org/10.3389/fpls.2020.00244.

29

Utilização do nariz eletrônico para o monitoramento de gases emitidos por plantas de soja sob estresse hídrico

Use of electronic nose to monitor gases emitted by soybean plants under water stress

Paulo Sergio de Paula Herrmann Junior[1], Matheus Santos Luccas[2], Ednaldo José Ferreira[3], André Torre-Neto [4]

[1] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, paulo.herrmann@embrapa.br*
[2] *M.Sc., Universidade de São Paulo, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, São Carlos (SP), Brasil, matsluccas@gmail.com*
[3] *Analista, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, ednaldo.ferreira@embrapa.br*
[4] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, andre.torre@embrapa.br*

RESUMO

O desenvolvimento de métodos não invasivos e ferramentas acessíveis para aplicação na fenotipagem de plantas é considerado um importante avanço. Este trabalho apresenta os resultados adquiridos com um nariz eletrônico (E-Nose) o qual é utilizado como uma ferramenta acessível. Um E-Nose é um sistema eletrônico usado para análise global de odores, que emula a estrutura do nariz humano. A soja (*Glycine Max*) foi utilizada para conduzir esse experimento sob estresse hídrico. Foi utilizado um E-Nose comercial, e uma cubeta foi projetada e construída para realizar a medição da amostra de gás da soja. Esse experimento foi conduzido durante 35 dias, observando-se as fases de crescimento das plantas durante este período. O recipiente coletor está equipado com sensores de umidade relativa (RH%), temperatura (°C) e CO_2 (ppm_v), além de monitorar a intensidade da luz natural. Esse sistema permite o monitoramento intermitente de cada parâmetro para criar um banco de dados. O solo utilizado foi do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico e foi recoberto para evitar a evaporação pela sua superfície. A medição com o nariz eletrônico foi realizada diariamente, pela manhã e à tarde, e em duas situações fenológicas da planta (com soja irrigada e sob estresse hídrico) até o estágio V5 de crescimento, visando obter as emissões de gases da planta. Com base nos resultados obtidos pelo E-Nose e demais sensores, foi possível distinguir as duas situações: planta sob condição de irrigação normal e sob estresse hídrico. Além disso, o método de medição permitiu verificar a influência dos dois períodos de luz (manhã, às 9h30 e tarde às 15h30) ao longo dos dias de experimento.

Palavras-chave: E-Nose; estresse hídrico; fenotipagem não invasiva; agricultura de precisão; soja.

ABSTRACT

The development of non-invasive methods and accessible tools for application in plant phenotyping is considered an important advance. This study presents the results obtained with an electronic nose (E-Nose), which is used as an accessible tool. An E-Nose is an electronic system used for odor global analysis, which emulates the structure of the human nose. Soybean (Glycine Max (L.) Merr.) was used to conduct this experiment under water stress. A commercial E-Nose was used, and a cuvette was designed and built to measure the soya gas sample. The experiment was conducted over 35 days, observing the plant growth stages during this time. The collection container is equipped with sensors for relative humidity (RH%), temperature (°C), and CO_2 (ppm_v), in addition to monitoring the intensity of natural light. This system allowed for intermittent monitoring of each parameter to create a database. The soil used was dystrophic Red-Yellow Latosol and was covered to prevent evaporation from its surface. The measurement with the E-Nose was conducted daily, in the morning and afternoon, and under two phenological stages of the plant (with irrigated soya and under water stress) until the V5 growth stage, aiming to obtain the plant's gas emissions. Based on the results obtained from the E-Nose and other sensors, it was possible to distinguish the two situations: plant under normal irrigation condition and under water stress. Additionally, the measurement method allowed for verifying the influence of the two light periods (morning at 9.30am and afternoon at 3.30pm) throughout the days of the experiment.

Keywords: E-Nose; water stress; non-invasive phenotyping; precision agriculture; soybean.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000086

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

Os novos métodos não invasivos de fenotipagem de plantas requerem abordagens multidisciplinares e transdisciplinares e o relacionamento com pesquisadores e profissionais de diversas áreas, tais como engenharia, física, geociências, ciência vegetal, informática, instrumentação e fisiologia vegetal. Dispositivos baratos e leves, instrumentos versáteis, sensores e biossensores são o que pesquisadores de diversas áreas esperam para aplicações essenciais na área do desenvolvimento de novos métodos e técnicas de fenotipagem de alto desempenho e na agricultura. Nesse sentido, a pesquisa com abordagens não invasivas em ciências vegetais é considerada o estado da arte em fenotipagem (Fiorani; Schurr, 2013).

O conceito de nariz eletrônico foi inicialmente proposto em 1982 na Universidade de Warwick por Persaud e Dodd (1982). A definição mais aceita foi dada por Gardner e Bartlett (1994). Eles descrevem o sistema como "um instrumento composto por um conjunto de sensores eletrônicos, que possuem especificidade e um sistema de reconhecimento padrão capaz de reconhecer substâncias olfativas de estrutura simples a complexa" (Schaller et al., 1998). O nariz humano é mais complexo do que outros sistemas sensoriais, como ouvidos e olhos, quando se trata de mecanismos responsáveis por reações imediatas a um estímulo externo. Assim, é muito mais simples imitar os sistemas auditivo e visual do que o sistema olfativo. Na olfação, centenas de diferentes classes de sensores biológicos estão envolvidas. Cada célula receptora olfativa possui apenas um único tipo de receptor de odor, e cada receptor pode detectar um número limitado de substâncias (Lozano et al., 2005). A Figura 1 mostra um diagrama de blocos do conceito de funcionamento do E-Nose.

Tem sido amplamente utilizado e investigado por grandes empresas nos setores de alimentos, cosméticos, embalagens, farmacêutico, químico, petroquímico, agricultura (Steffens et al., 2014; Manzoli et al., 2011., Manzoli et al., 2019), na pecuária, o qual está sendo utilizado para monitoramento do período fértil de vacas. Na medicina vem sendo utilizado para detecção de produtos químicos, rastreando pacientes com câncer de pulmão (de Vries et al., 2019). O sistema está se mostrando rápido, simples, de baixo custo e não destrutivo para controle de qualidade e tomada de decisão. Na agricultura, observa-se que as técnicas atuais de

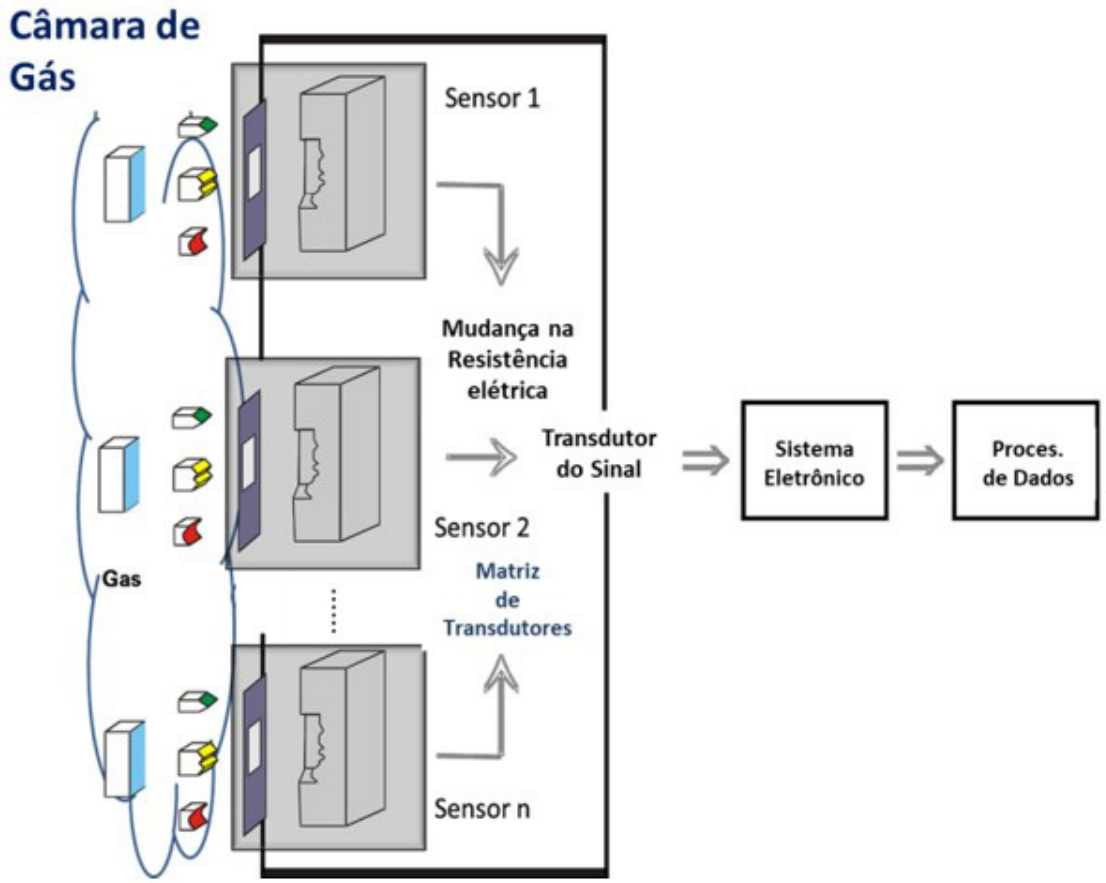


Figura 1. O diagrama de blocos de um princípio de trabalho de um E-Nose, mostrando os blocos dos sensores, transdutor de sinal, sistema eletrônico e o processamento de dados. Adaptado de Herrmann et al. (2024).

monitoramento em si, bem como o monitoramento de insetos e pragas, são demoradas e com resultados variáveis. Produtores e consultores acham difícil encontrar ferramentas fáceis de manusear, acessíveis, adequadas e confiáveis para tomada de decisão e gestão. Vários tipos de sensores podem ser utilizados no nariz eletrônico, como polímeros condutores (Manzoli et al., 2011), "Carbon Black" (Garcia-Berrios et al., 2013), nanotubos de carbono (Chatterjee et al., 2013), entre outros.

O estresse hídrico induz uma série de respostas fisiológicas e bioquímicas nas plantas, como fechamento estomático, repressão do crescimento e da fotossíntese e ativação da respiração (Hale; Orcutt, 1987).

A transpiração consiste em vaporizar a água líquida nos tecidos vegetais e remover o vapor para a atmosfera. As culturas perdem predominantemente água através dos estômatos. Fatores ambientais que afetam a transpiração alteram o gradiente de vapor de água entre a superfície da folha e o ar circundante: o balanço energético entre o sol e a folha, umidade e temperatura do ar, vento e disponibilidade de água no solo (Angelocci et al., 2004). Portanto, a transpiração se intensifica com a diminuição da umidade relativa do ar e o aumento da temperatura do ar.

A soja é de grande importância econômica para o Brasil, que é considerado o segundo maior produtor mundial desta cultura, afetando diretamente o PIB nacional.

O E-Nose pode ser utilizado como uma ferramenta para avaliar o nível de estresse hídrico, por intermédio da detecção dos gases emanados pela soja, como um novo método de fenotipagem de plantas e aplicado à agricultura de precisão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Nariz eletrônico (Electronic Nose) Alpha FOX 2000

Foi utilizado o modelo "Electronic Nose Alpha FOX 2000", da empresa Alpha Fox, acompanhado de softwares para processamento e análise de dados. O equipamento dispõe de seis sensores semicondutores CMOS que medem variação na condutância elétrica (Ω^{-1}) devido à interação dos gases com a superfície do semicondutor (Fox Analyzer, 2001).

2.1.1 Cálculo da sensibilidade (S(%)) dos sensores do E-Nose

A sensibilidade (S(%)) dos sensores do E-Nose foi obtida por intermédio da Equação (1):

$$S(\%) = \left(\frac{R - R_0}{R_0}\right) * 100 \quad (\%) \qquad (1)$$

Onde:
R_0 – Resistência elétrica inicial (Ω);
R – Resistência elétrica variando durante o tempo (Ω).

2.1.2 Análise dos dados do E-Nose por intermédio da área do gráfico radar

Um gráfico de radar de área é um tipo de gráfico de radar que usa a área delimitada pelas linhas que conectam os pontos de dados para representar os valores. Na Figura 2 há uma representação do gráfico do radar e da área do radar até o pico da sensibilidade [S (%)]. Isto pode ser útil para comparar o desempenho geral de grupos de dados distintos. Liu e colaboradores usaram o método que utiliza gráficos de radar para visualizar dados multidimensionais. Os gráficos de radar são um tipo de gráfico que pode ser usado para representar múltiplas variáveis ao mesmo tempo (Liu et al., 2008).

2.1.2.1 Cálculo da área do radar

A área do radar (A_n) foi calculada com a Equação (2) onde $X_i = S_i \{S_1(\%), S_2(\%), S_3(\%), S_4(\%), S_5(\%), S_6(\%)\}$.

$$A_n = \frac{1}{2} sin \frac{2\pi}{n} \sum_{i=1}^{n} x_{i-1} * x_i \qquad (\text{U.A.}) \qquad (2)$$

2.2 Câmara instrumentada

A câmara instrumentada foi desenvolvida para medida do gás liberado pela planta de soja no interior da câmara. Tem-se que as dimensões da câmara instrumentada utilizada no experimento são de: diâmetro d = 0,25 m, altura h = 0,57 m, volume total = 27,93 L.

Essa câmara também foi projetada para permitir que a irrigação fosse administrada sem comprometer o isolamento da planta. O vaso contendo o solo foi

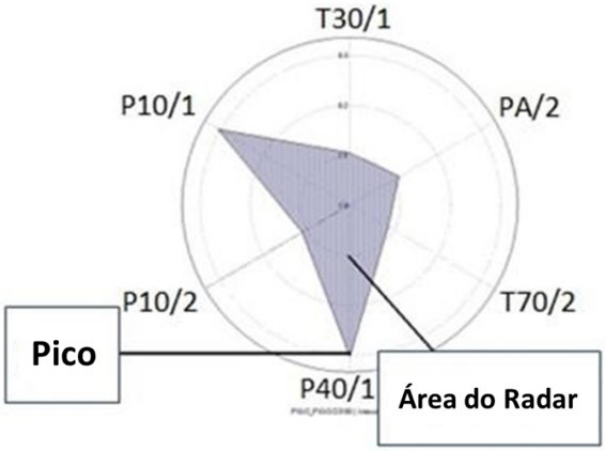


Figura 2. O gráfico radar e a área do radar, com o pico de sensibilidade (%) (S(%)) dos seis sensores (S1: T30/1; S2: P10/1; S3: P10/2; S4: P40/1; S5: T70/2 e S6: PA/2) do E-Nose.

coberto com papel alumínio para evitar trocas gasosas entre este meio e a câmara. A técnica para obtenção do gás foi o "headspace". A umidade interna foi controlada com ar seco (99% de pureza).

Foi realizado o monitoramento da temperatura (°C), umidade relativa (%) e concentração de CO_2 (ppm_v), tanto no interior como fora da câmara. Os sensores utilizados foram: sensor interno Vaisala CO_2 Probe GMP252 para medição dos níveis de CO_2 e um modelo externo Vaisala CO_2 Probe GMP343, ambos operando na faixa de 0 - 2000ppm_v; um termômetro digital interno e externo com resolução de 0,1 °C; um sensor de umidade relativa interno e externo com resolução de 0,5%. A luminosidade desse experimento foi natural e medida através de um luxímetro com faixa de variação de 0,001 a 19,9 mil lúmen/m^2.

2.3 Planta utilizada no experimento: soja (*Glycine max*)

Foi utilizada a cultivar de soja (*Glycine max L. Merrill*) BR-16 (Embrapa, Brasil), que foi tratada e submetida à seca sob condições controladas. As plantas de soja BR-16 foram irrigadas durante a fase de crescimento e depois submetidas ao estresse por nove dias consecutivos. Os experimentos foram realizados em ambiente de laboratório, durante o crescimento das plantas até o estádio V5 do seu ciclo vegetativo. As plantas em V5 têm aproximadamente 0,25 a 0,30 m de altura.

2.4 Procedimentos de irrigação

A irrigação foi realizada com água deionizada Milli-Q (~12 MΩ•cm), através da válvula adaptada da câmara. O volume de irrigação foi de 100 mL de água Milli-Q a cada dois dias, durante 10 dias, sendo interrompida após esse período. O controle da irrigação ocorreu por meio de cálculos da quantidade de água desejada, com base no valor de umidade volumétrica do ponto de murcha.

2.5 Solo utilizado

O solo utilizado para este experimento foi um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd) com a seguinte granulometria: argila: 369 g/kg); silte: 54 g/kg; areia: 577 g/kg, com umidade na capacidade de campo (considerada na tensão da água de - 10 KPa) de 0,295 cm^3/cm^3 e umidade no ponto de murcha permanente (considerada na tensão da água de -1.500 kPa) de 0,134 cm^3/cm^3. A amostra de solo foi obtida do Laboratório Nacional de Agricultura de Precisão da Embrapa (Lanapre), localizado nas coordenadas geográficas 21°57'14" S e 47°51'08" W, com altitude de 860 m.

Em estudo realizado por Ferreira et al. (2015) demonstraram que o isolamento é eficaz em fazer com que as perdas de água sejam decorrentes apenas da transpiração. O volume do pote utilizado foi Vpot = 8,1 L. As dimensões são altura (hpot) = 0,245 m, diâmetro (Dpot) = 0,145 m.

3 RESULTADOS

O experimento foi conduzido no verão de janeiro de 2020, entre 10 e 32 dias após a semeadura (DAS). As Figuras 3A, 3B, 3C e 3D mostram os resultados de forma gráfica, para o período de medição de 22 dias. Os dados dos sensores e do E-Nose (Figuras 3 e 4) foram coletados no período da manhã, às 9h30 e da tarde às 15h30.

4 DISCUSSÃO

Os dados do E-Nose e da câmara foram processados e computados. Observou-se a dinâmica de crescimento da planta, por intermédio do monitoramento do crescimento vegetativo, das mensurações dos sensores de temperatura interna e externa, do CO_2 externo e interno, das medidas da umidade relativa externa e interna e da luminosidade do ambiente. Todas as medidas ocorreram nas duas condições de estado hídrico (irrigado normal e sob estresse hídrico). A Figura 4 apresenta os resultados obtidos com o E-Nose, por intermédio do cálculo da área do radar (U.A.), advindo da resposta dos seis sensores. As regressões lineares nas Figuras 3A, 3B, 3C e 3D representam as linhas de tendências para os parâmetros medidos, durante as duas fases (irrigado e não irrigado). Pela Figura 3A verifica-se que a temperatura aumenta dentro da câmara, em torno de 3 °C, dependendo do período do dia, quando comparado com a temperatura externa, do laboratório. O CO_2 medido mostra uma diminuição interna de aproximadamente 250 ppm_v, bem como é possível observar pela Figura 3B a diferença da emissão do dióxido de carbono para o estado irrigado e não irrigado, nos dois períodos do dia. A luminosidade medida, apresentada na Figura 3C, mostra que durante o período do experimento a manhã (9h30) foi mais iluminada (15h30) que a tarde, e a diferença chegou a cerca de 1.500 lúmen/m^2. Com relação à umidade relativa, tanto medida internamente quanto externamente à câmara (Figura 3D), há um valor mediano, descontados os períodos do dia, bem como os estados de estresse hídrico, em torno de 15% maior na câmara, sendo que na fase não irrigada passa a ser de aproximadamente 34%. Isso mostra que a planta está transpirando mais no período de estresse hídrico, em particular no período da manhã. A Figura 4 representa os resulta-

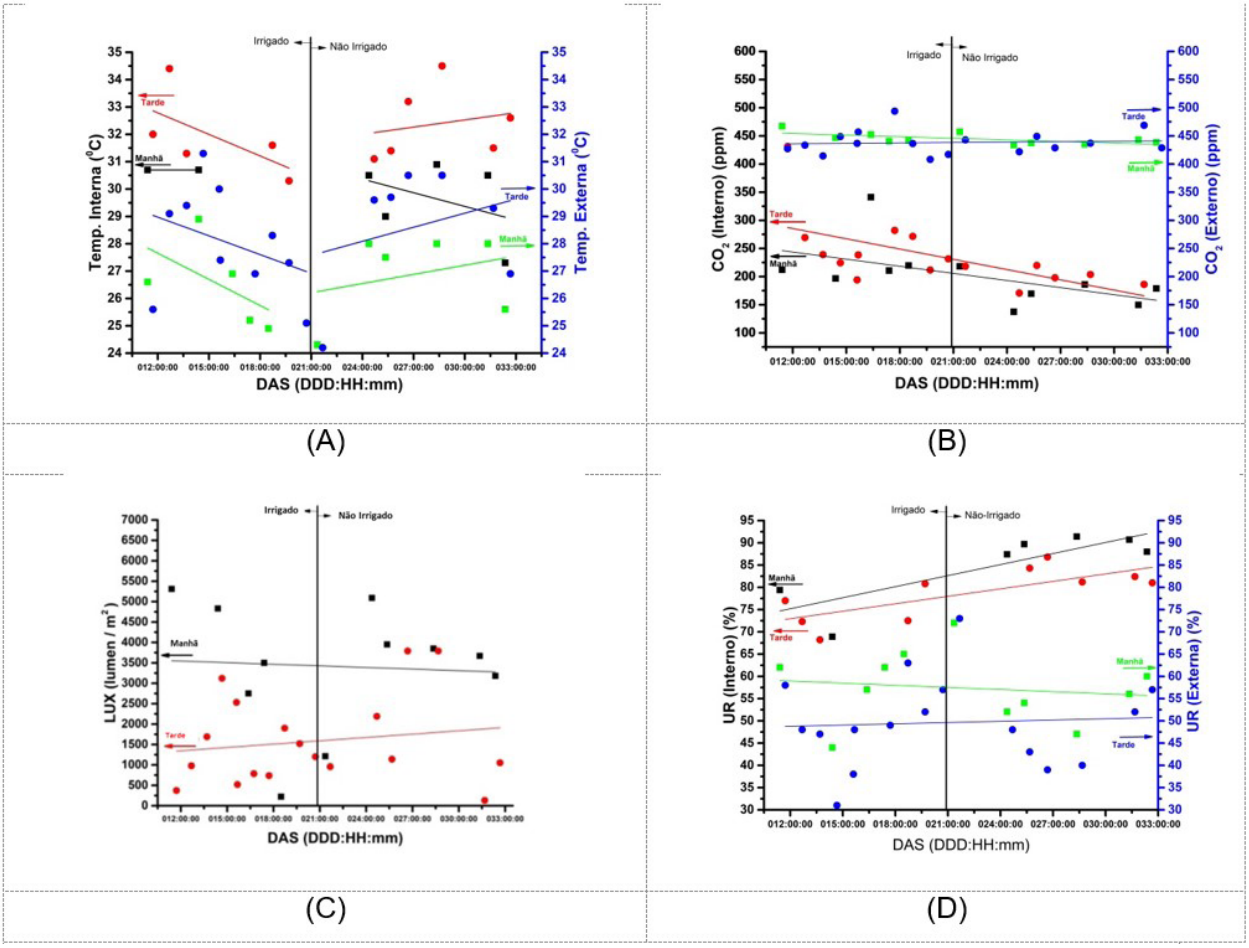


Figura 3. Medida da temperatura externa (azul) e interna (preto) (A); de CO_2 externo (azul) e interno (preto) (B); da luminosidade (LUX) do meio ambiente (C), mostrando a diferença de luminosidade durante o período do experimento; e da umidade relativa (RH) externa (azul) e interna (preto) (D); apresentando as linhas de tendências para os dois período de medida (manhã, às 9h30 e tarde, às 15h30), em função de DAS (dias após a semeadura), para a planta irrigada e sob estresse hídrico (não irrigada). Figuras adaptadas de Herrmann et al. (2024).

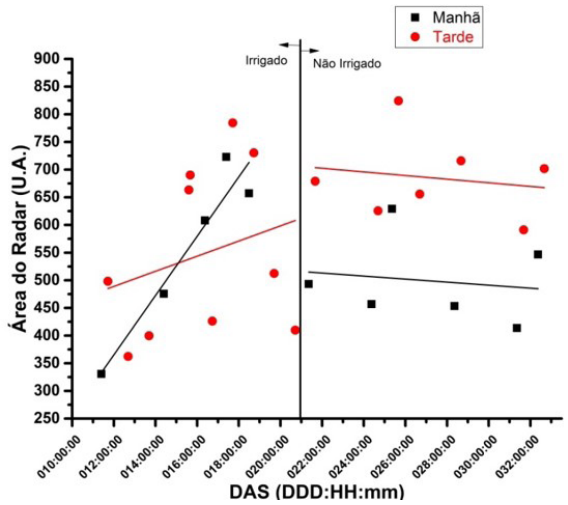


Figura 4. Medidas realizadas com E-Nose, por intermédio da obtenção da área do radar (UA), da amostragem do gás extraído da câmara durante o DAS, em função da hora do dia (manhã, às 09h30, círculo vermelho, e tarde, às 15h30, quadrado preto), para a planta irrigada e sob estresse hídrico (não irrigada). Figura adaptada de Herrmann et al. (2024).

dos das medidas de gás na câmara com a planta de soja em crescimento, durante o experimento, por intermédio dos dados obtidos com E-Nose. Os valores da área do radar (U.A) apresentam o comportamento da planta sendo hidratada e em crescimento, e após o período de 10 dias ocorreu a retirada completa de irrigação, mostrando uma mudança do comportamento e ressaltando a diferença entre as amostras obtida no período da manhã e à tarde. Um delta, em termos de área do radar de aproximadamente 200 U.A, mostrando que há uma detecção na intensidade de maior liberação de gás durante as 15h30.

5 CONCLUSÃO

Foi observado um padrão de fotorrespiração com a avaliação da coleta de dados. A partir dos resultados obtidos com os sinais eletrônicos do nariz, foi possível distinguir as duas situações: a planta irrigada e a

sob estresse hídrico. O E-Nose foi capaz de detectar a diferença no gás extraído da câmara durante o DAS em função do horário do dia (manhã, às 9h30 e tarde, às 15h30).

Com os resultados iniciais obtidos utilizando o E-Nose foi possível distinguir as duas situações, ou seja, a planta irrigada normalmente e sob estresse hídrico, e a influência dos dois períodos de luz diurno do dia.

Experimentos futuros serão realizados utilizando o E-Nose e aprendizado de máquina, os quais possibilitarão indicar a aplicação dessas técnicas para investigação da severidade do estresse hídrico, bem como para outras espécies além da soja e para outros tipos de estresses bióticos a abióticos, uma vez que venham a interferir na emissão de compostos orgânicos voláteis (COVs) liberados pelas plantas, com consequente influência em outros indicadores. Apesar de o trabalho ter sido realizado em laboratório, avanços futuros poderão viabilizar a aplicação da técnica em campo, utilizando sistemas portáteis, contribuindo assim para o melhor manejo das culturas e a aplicação em mapeamentos da variabilidade espacial e temporal visando o manejo sítio específico, e na irrigação em prol de novos sensores não invasivos e não destrutivos para a fenotipagem de plantas e para a agricultura de precisão.

AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório Nacional de Nanotecnologia para o Agronegócio (LNNano) da Embrapa Instrumentação, pelo uso do nariz eletrônico, ao projeto Tecnologias com Potenciais Disruptivos para Automação e AP, nº 11.14.09.001.04.00, e ao Centro de Pesquisa em Genômica para Mudanças Climáticas. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) nº 2016/23218-0 - Centros de Pesquisa em Engenharia (CPE).

REFERÊNCIAS

ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R.; OLIVEIRA, R. F.; RIGHI, E. Z. Transpiration, leaf diffusive conductance, and atmospheric water demand relationship in an irrigated acid lime orchard. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. *16*, n. 1, p. 53-64, 2004. DOI: http://doi.org/10.1590/S1677-04202004000100008.

CHATTERJEE, S.; CASTRO, M.; FELLER, J.F. An e-nose made of carbon nanotube based quantum resistive sensors for the detection of eighteen polar/nonpolar VOC biomarkers of lung cancer. **Journal of Materials Chemistry. B, Materials for Biology and Medicine**, v. *1*, n. 36, p. 4563-4575, 2013. DOI: http://doi.org/10.1039/c3tb20819b.

DE VRIES, R.; MULLER, M.; VAN DER NOORT, V.; THEELEN, W. S. M. E.; SCHOUTEN, R. D.; HUMMELINK, K.; MULLER, S. H.; WOLF-LANSDORF, M.; DAGELET, J. W. F.; MONKHORST, K.; MAITLAND-VAN DER ZEE, A. H.; BAAS, P.; STERK, P. J.; VAN DEN HEUVEL, M. M. Prediction of response to anti-PD-1 therapy in patients with non-small cell lung cancer by electronic nose analysis of exhaled breath. **Annals of Oncology: Official Journal of the European Society for Medical Oncology**, v. *30*, n. 10, p. 1660-1666, 2019. DOI: http://doi.org/10.1093/annonc/mdz279.

FERREIRA, L.C., NEIVERTH, W., MARONEZZI, L.F.F., SIBALDELLI, R.N.R., NEPOMUCENO, A.L., FARIAS, J.R.B., et al. (2015). Efficiency of cover materials in preventing evaporation in drought-stressed soybeans grown in pots. **Rev. Cienc. Agrar.** 58 (4), 359–356. doi: 10.4322/rca.1861

FIORANI, F.; SCHURR, U. Future scenarios for plant phenotyping. **Annual Review of Plant Biology**, v. *64*, n. 1, p. 267-291, 2013. DOI: http://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050312-120137.

FOX ANALYZER. **Hardware User's Guide**: Manual Number 001. Local: Publisher, 2001.

GARCIA-BERRIOS, E.; THERIOT, J. C.; WOODKA, M. D.; LEWIS, N. S. Detection of ammonia, 2,4,6-trinitrotoluene, and common organic vapors using thin-film carbon black-metalloporphyrin composite chemiresistors. **Sensors and Actuators. B, Chemical**, v. *188*, p. 761-767, 2013. DOI: http://doi.org/10.1016/j.snb.2013.07.006.

GARDNER, J. W.; BARTLETT, P. N. A brief-history of electronic noses. **Sensors and Actuators. B, Chemical**, v. *18*, n. 1-3, p. 211-220, 1994. DOI: http://doi.org/10.1016/0925-4005(94)87085-3.

HALE, M.G.; ORCUTT, D.M. **The physiology of plants under stress.** New York: Wiley, 1987.

HERRMANN, P. S. P.; SANTOS LUCCAS, M.; FERREIRA, E. J.; TORRE NETO, A. Application of electronic nose and machine learning used to detect soybean gases under water stress and variability throughout the daytime. **Frontiers in Plant Science**, v. *15*, p. 1323296, 2024. DOI: http://doi.org/10.3389/fpls.2024.1323296.

LIU, W. Y.; WANG, B. W.; YU, J. X.; LI, F.; WANG, S. X.; HONG, W. X. Visualization classification method of multi-dimensional data based on radar chart mapping. In: SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE LEARNING AND CYBERNETICS. **Proceedings** [...]. New York: IEEE, 2008. p. 857-862. DOI: http://doi.org/10.1109/ICMLC.2008.4620524

LOZANO, J.; SANTOS, J. P.; HORRILLO, M. C. Classification of white wine aromas with an electronic nose. **Talanta**, v. *67*, n. 3, p. 610-616, 2005. DOI: http://doi.org/10.1016/j.talanta.2005.03.015.

MANZOLI, A.; STEFFENS, C.; PASCHOALIN, R. T.; CORREA, A. A.; WILLIAM, F.; LEITE, F. L.; HERRMANN, P. S. P. Low-cost gas sensors produced by the graphite line-patterning technique applied to monitoring banana ripeness. **Sensors (Basel)**, v. *11*, n. 6, p. 6425-6434, 2011. DOI: http://doi.org/10.3390/s110606425.

MANZOLI, A.; STEFFENS, C.; PASCHOALIN, R. T.; GRABOSKI, A. M.; MELLO BRANDÃO, H.; DE CARVALHO, B. C.; BELLINI, J. L.; HERRMANN, P. S. P. Volatile compounds monitoring as indicative of female cattle fertile period using electronic nose. **Sensors and Actuators. B, Chemical**, v. *282*, p. 609-616, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.snb.2018.11.109.

PERSAUD, K.; DODD, G. Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose. **Nature**, v. *299*, n. 5881, p. 352-355, 1982. DOI: http://doi.org/10.1038/299352a0.

SCHALLER, E.; BOSSET, J. O.; ESCHER, F. Electronic noses and their application to food. **Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie**, v. *31*, n. 4, p. 305-316, 1998. DOI: http://doi.org/10.1006/fstl.1998.0376.

STEFFENS, C.; LEITE, F. L.; MANZOLI, A.; SANDOVAL, R. D.; FATIBELLO, O.; HERRMANN, P. S. P. Microcantilever sensors coated with a sensitive polyaniline layer for detecting volatile organic compounds. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v. *14*, n. 9, p. 6718-6722, 2014. DOI: http://doi.org/10.1166/jnn.2014.9348.

Seção 2

Culturas anuais

Seção Culturas Anuais

As culturas anuais produtoras de grãos, fibras, biomassa e energia, atualmente, ocupam, segundo dados da Conab, uma área de 78,5 milhões de hectares no Brasil. De Norte a Sul do país, esses cultivos desempenham papel de grande relevância para a sustentabilidade da agricultura como uma atividade econômica importante para a sociedade brasileira. Sejam cultivadas de forma isolada ou integradas ou em sistemas que integram lavouras, explorações pecuárias e florestais (sistema ILPF), essas culturas são geradoras de matéria prima para uso interno e para exportação, contribuindo sobremaneira para o superávit da balança comercial brasileira e por movimentar, internamente, vários complexos agroindustriais.

A utilização da agricultura de precisão (AP) e da agricultura digital (AD) em espécies anuais é fundamental para melhorar o desempenho dessas culturas nas lavouras. Pode contribuir para otimizar o uso dos recursos naturais, reduzir os riscos de perdas e minimizar o impacto ambiental. Além disso, a AP pode aumentar a eficiência no uso de insumos e no aproveitamento da genética das cultivares, destacando-se, como consequência, o aumento do potencial de rendimento e do retorno econômico dos empreendimentos agrícolas. Em função da grande variabilidade edafoclimática, de estrutura fundiária, de disponibilidade tecnológica e de sistemas de produção na agricultura brasileira, as oportunidades para uso de preceitos e ferramentas da AP são grandes. Essa realidade, também, representa espaço relevante para o empreendedorismo, possibilitando a geração de novos modelos de negócio e formas de prestação de serviço no meio rural.

Apesar do crescimento da AP no Brasil, especialmente em sistemas de produção que envolvem culturas anuais, ainda é notória a oportunidade de avanços e inovações em várias áreas de aplicação. O fato de que as pesquisas e o desenvolvimento de novas tecnologias em AP geralmente ocorrem em ambientes reais, com a participação de diversos atores ligados ao setor agrícola – como agricultores, assistentes técnicos, pesquisadores, professores, consultores, prestadores de serviço, empresas do setor de mecanização e tecnologias, entre outros –, proporciona maior possibilidade de adoção quase imediata pelos usuários interessados, gerando impactos positivos no curto e médio prazos.

Esta seção apresenta resultados de pesquisas relevantes para as culturas do algodão, do milho, da soja e do trigo, contemplando a caracterização da variabilidade espacial e temporal de atributos de solo, das planta e do ambiente, além de tecnologias e metodologias para definição de zonas de manejo, de manejo e aplicação de insumos em taxa variável, e indicadores metodológicos para realização de ensaios *on-farm* no âmbito da AP. Esses resultados são fruto do esforço de equipes multidisciplinares da Embrapa e de parceiros que atuam em diferentes regiões do Brasil, buscando, primordialmente, a evolução no uso da AP, via adaptação de tecnologias para a realidade específica de cada empreendimento rural.

João Leonardo Fernandes Pires
Carlos Manoel Pedro Vaz

30

Variabilidade dos solos usando técnicas geoespaciais e *machine learning* para monitoramento nutricional e estimativa da produtividade do algodoeiro

Soil variability using geospatial techniques and machine learning to nutritional monitoring and estimation of cotton yield

Ziany Neiva Brandão[1], Hugo Machado Rodrigues[2], Ronaldo Pereira de Oliveira[3], Everaldo Paulo Medeiros[4], Franciele Morlin Carneiro[5], Luciano Shozo Shiratsuchi[6]

[1] *Pesquisadora, Embrapa Algodão, Campina Grande (PB), Brasil, ziany.brandao@embrapa.br*
[2] *Doutorando, Seropédica (RJ), Brasil, rodrigues.machado.hugo@gmail.com*
[3] *Pesquisador, Embrapa Solos, Rio de Janeiro (RJ), Brasil, ronaldo.oliveira@embrapa.br*
[4] *Pesquisa, Embrapa Algodão, Campina Grande (PB), Brasil, everaldo.medeiros@embrapa.br*
[5] *Pós-Doutoranda, Louisiana State University, Baton Rouge (LA), USA, franmorlin1@gmail.com*
[6] *Professor Associado, Louisiana State University, Baton Rouge (LA), USA, LShiratsuchi@agcenter.lsu.edu*

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicação de técnicas de estatística espacial e *machine learning* (aprendizado de máquina) e identificar o algoritmo mais eficiente na predição da produtividade do algodoeiro *in situ*, em uma área com 27,2 ha em Cristalina, GO, Brasil. Foram utilizados dados de condutividade elétrica (CEa) e susceptibilidade magnética (SMa), medidos em duas profundidades, aqui denominadas de rasa e profunda (0,5 m e 1,0 m, respectivamente), sendo ambos obtidos pelo sensor EM38-MK2, e coletados antes da semeadura. A partir das imagens multiespectrais do satélite Sentinel-2, foram calculados os índices de vegetação (IVs), NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e o NDREb (*Normalized Difference Red Edge Index*) em duas épocas distintas. O índice de vegetação MPRI (*Modified Photochemical Reflectance Index*) foi obtido a partir de um veículo aéreo não tripulado comercial, equipado com câmera RGB, enquanto o Modelo Digital de Elevação (MDE) foi obtido pelo satélite Alos-Palsar. Oito covariáveis foram utilizadas para a estimativa espacial da produtividade de algodão. Os dados de produtividade de algodão foram mapeados via krigagem ordinária (KO), a partir de 100 pontos distribuídos aleatoriamente na área de estudo para servir como mapa de referência. Na modelagem da produtividade, foram comparados os Modelos Lineares Generalizados Mistos (GLMM) e *Random Forest* (RF). Para avaliação dos mapas, foi usada a validação cruzada do tipo *leave-one-out*. O GLMM apresentou a melhor combinação de covariáveis sem multicolinearidade, em que se utilizaram as covariáveis NDVI, NDREb, MPRI, SMa (1,0 m e 0,5 m) e o MDE. Para RF, as covariáveis que melhor representaram a produtividade foram a CEa e SMa, ambas na profundidade rasa, além do índice MPRI. O mapa de referência via KO apresentou R^2 e RMSE (*Root Mean Squared Error*) de 0,32 e 472 kg ha^{-1}, respectivamente, enquanto via GLMM foram obtidos R^2 e RMSE de 0,42 e 436 kg ha^{-1}. Observou-se que ambos os mapas obtidos, tanto via GLMM quanto por RF, apresentaram métricas melhores que KO e demonstram que o uso de covariáveis correlacionadas ambientalmente com a produtividade melhora a predição dos valores do rendimento do algodão.

Palavras-chave: sensor de indução eletromagnética; gerenciamento de culturas; métodos de classificação; imagens Sentinel-2.

ABSTRACT

This work aimed to evaluate spatial statistics and *machine learning* techniques, and to identify which algorithm is more efficient to predict the *in situ* cotton yield, in an area with 27.2 ha, located in Cristalina, in the Goiás state (GO), Brazil. Electrical conductivity (ECa) and magnetic susceptibility (MSa) were used at two depths, named here by shallow and deep (0.5 and 1.0 m, respectively), both obtained by EM38-MK2 sensor, and collected before sowing. From the multispectral images by the Sentinel-2 satellite, the vegetation index (VI), *i.e.*, Normalized

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000006

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalized Difference Red Edge Index (NDREb) were determined at two distinct periods. The Modified Photochemical Reflectance Index (MPRI) was obtained from an commercial unmanned aerial vehicle, equipped with a RGB camera. The Digital Elevation Model (DEM) was performed by the Alos Palsar satellite. Eight covariates were used for spatial estimate of cotton yield. Cotton yield data were mapped by ordinary kriging (KO), from 100 randomly distributed points in the study area to provide a reference map. Yield modeling was compared to Generalized Linear Mixed Models (GLMM) and Random Forest (RF). The evaluation metric of the maps used the leave-one-out cross-validation (LOOCV) method. The GLMM presented the best covariates without multicollinearity, where NDVI, NDREb, MPRI, SMa (1.0 and 0.5 m) and the DEM were selected. For RF, as covariates that best represent productivity for ECa and MSa, both at shallow depth, in addition to the MPRI index. The reference map via KO showed R^2 and RMSE (Root Mean Squared Error) of 0.32 and 472 kg ha^{-1}, respectively, while via GLMM, R^2 and RMSE were 0.42 and 4436 kg ha^{-1}. It was observed via GLMM, regarding RF, better measures than KO maps and that the use of covariates, environmentally correlated with the productivity factors, improved the prediction of the cotton yield values.

Keywords: electromagnetic induction sensor; plant management; classification method; Sentinel-2 imagery.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, técnicas muito usadas em ambiente industrial, como *machine learning* (ML), estão sendo direcionadas para o ambiente agrícola devido à intensificação da agricultura digital e à geração de grandes quantidades de dados (Singh et al., 2016). Interpoladores como krigagem ordinária (KO), inverso da distância ponderado, ou *spline*, por exemplo, tendem a subestimar a otimização do resultado quando da confecção dos mapas, aliado ao fato de desconsiderarem as inúmeras covariáveis ambientais, que podem ser combinadas para melhorar o mapa final da variável em estudo. Algoritmos ML são muito promissores para analisar grandes quantidades de dados, agindo de forma rápida, eficiente e precisa. Alguns exemplos de algoritmos ML são k-*Nearest-Neighbours* (kNN ou K-vizinho mais próximo), Regressão Linear Múltipla (*Multiple Linear Regression* – MLR), *Artificial Neural Networks*, (ANNs), e *Random Forest* (RF) (Badnakhe; Deshmukh, 2011).

Métodos baseados em *deep learning* (DP) para identificar regiões de interesse em imagens de algodão têm sido propostas (Fue et al., 2018). Outros métodos usando rede neural convolucional para detectar e contar o número de flores de algodão recém-abertas em imagens aéreas ou algoritmos para identificar e contar maçãs, estimando a produtividade do algodoeiro, também vêm sendo estudados (Yeom et al., 2018; Singh et al., 2022).

Em alguns cultivos agrícolas, como no algodoeiro, o crescimento indeterminado exige constante monitoramento com a aplicação de insumos e controle de pragas para que alcance a produtividade desejada, sendo então uma cultura apropriada para uso de técnicas que facilitem o manejo. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi identificar qual o algoritmo mais eficiente na predição da produtividade do algodoeiro em campo, usando dados de sensores proximais, como condutividade elétrica do solo e imagens proximais e orbitais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na Fazenda Pamplona, localizada no município de Cristalina, GO, safra 2018/2019, em uma área experimental de 27,2 ha, cujas coordenadas geográficas são 16°15’23’’S, 47°38’13’’O. O clima na região é tropical de altitude semiúmido, com máximas no verão de 33°C e mínimas de 11,6°C no inverno, com período chuvoso de outubro a março. Durante o ciclo da cultura, foram registrados 670,5 mm de precipitação pluvial, não chegando a atingir o mínimo esperado para a cultura, que são 700 mm, embora antes da semeadura tenham ocorrido 254 mm de precipitação pluvial.

Amostras de solo foram coletadas em pontos previamente georreferenciados, selecionados considerando a variação da produtividade observada nos mapas de produtividade dos anos anteriores. Foram retiradas oito subamostras com profundidade de 0-20 cm em torno do ponto central georreferenciado, e o material foi levado para análise físico-química do solo (Embrapa, 1997). A área experimental apresenta Latossolo vermelho-amarelo, com textura argilosa a muito argilosa, (48% a 67% de argila), apresentando em média 10,5% de areia, 54,3% de argila e 35,2% de silte, cujos valores médios são apresentados na Tabela 1. As adubações foram realizadas de acordo com as recomendações técnicas para a cultura.

A fazenda mantém o histórico de adubações, mapas de produtividade e captura de imagens aéreas, o que facilitou a avaliação inicial. Durante o ciclo, a cultura foi monitorada com manejo para controle de plantas daninhas, pragas e doenças. Usou-se a cultivar FM 954 GLT, com espaçamento de 0,76 m entre

Tabela 1. Valores médios das características físico-químicas do solo da área experimental na Fazenda Pamplona, GO, safra 2018/2019, com 16 amostras compostas por oito subamostras cada, coletadas na profundidade de 0-20 cm.

pH	MO	Ntotal	P	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	H + Al	CTC	SB
água	(g kg^{-1})	(g kg^{-1})	(mgdm^{-3})	(mgdm^{-3})	.....(cmol$_c$ dm^{-3}).....				
5,53	28,9	1.34	5,10	93,8	1,21	0,83	7,10	9,30	2,31

linhas, semeada em dezembro de 2018 e colhida em julho de 2019.

A condutividade elétrica aparente (CEa) e a susceptibilidade magnética aparente do solo (SMa) foram quantificadas para toda a área experimental em duas profundidades simultaneamente, por meio do sensor de indução eletromagnética EM8-MK2 da Geonics®. As distâncias usadas entre bobinas foram de 1,0 m (profunda) e 0,5 m (rasa) (Heil; Schmidhalter, 2017).O sensor foi adaptado à parte traseira de uma caminhonete, e as medidas foram coletadas e armazenadas, sendo georreferenciadas por um receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) da Trimble de alta precisão. Adicionalmente foram obtidos dados de latitude, longitude e elevação (m).

Imagens geradas pelo sensor MSI (*Multispectral Instrument*) do satélite Sentinel-2 foram obtidas aos 100DAE (dias após a emergência), em 05/04/2019, e aos130DAE em 10/05/2019, sendo estas duas fases fenológicas distintas do algodoeiro, com a primeira delas correspondendo à floração e a segunda à frutificação (maçãs adultas no terço médio das plantas). As bandas espectrais do sensor MSI do Sentinel-2 possuem duas resoluções espaciais distintas, sendo quatro bandas com resolução de 10 m e seis com resolução de 20 m (Sentinel-2, 2022). As faixas espectrais usadas nesse trabalho foram 3 (G-verde), 4 (R-vermelho), 5 (B5-início do *red-edge* (≈ 705nm)), 7 (B7-início do infravermelho próximo (≈ 783 nm)), e 8 (NIR-infravermelho próximo).

Após a correção do georreferenciamento, foi realizada a calibração radiométrica das imagens e obtenção das refletâncias para cada banda. A precisão dos pontos marcados com o GPS Garmim76CSx foi avaliada, e preparado o contorno da área de interesse.

As imagens nas regiões do visível e infravermelho próximo serviram para obtenção dos Índices de Vegetação (IVs). Nesse trabalho foram usados os seguintes IVs: 1) NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), NDREb (*Normalized Difference Red-Edge Index*), com o ***b*** (denominação dada no presente trabalho), fazendo referência aos seus desenvolvedores em Barnes et al. (2000), devido aos comprimentos de onda usadas neste aqui, que são as mais próximas do trabalho original, em que eles usaram 790 nm e 720 nm. Já o MPRI (*Modified Photochemical Reflectance Index*), proposto por Yang et al. (2008), foi obtido da imagem RGB (*Red*, *Green* e *Blue*) de alta resolução instalada em um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). Os IVs foram obtidos pelas seguintes expressões:

NDVI

$$(\rho_{NIR} - \rho_R)/(\rho_{NIR} + \rho_R) \quad (1)$$

NDREb

$$(\rho_{B7} - \rho_{B5})/(\rho_{B7} + \rho_{B5}) \quad (2)$$

MPRI

$$(\rho_G - \rho_R)/(\rho_G + \rho_R) \quad (3)$$

em que ρ_x é a refletância obtida no comprimento de onda x

Na primeira avaliação, foram adquiridas imagens da área experimental (Figura 1a),com altura aproximada de setenta metros acima do dossel, usando um VANT comercial modelo Phantom 4Pro®, no estádio de floração plena do algodoeiro. Na mesma data foram coletadas amostras de tecido foliar das plantas e imagens de satélite.

Antes da colheita mecanizada, foram obtidas manualmente amostras de capulhos de algodão em torno dos pontos centrais. A amostra padrão foi constituída por sessenta capulhos colhidos no terço médio das plantas (Bradow et al., 1997), gerando três subamostras de aproximadamente 50,0 g de pluma colhidas em torno do ponto central. A produtividade do algodão foi obtida com colheita mecanizada, utilizando a colhedora John Deere® modelo CP690 (John Deere, 2022). Foram registrados a cada 3 segundos a produtividade do algodoeiro, a latitude, longitude e altitude (m). Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F a 1% e 5% de probabilidade (erro tipo II). Para análise estatística, utilizou-se o software *R* (R Core Team, 2021). Quando verificado efeito significativo na análise de variância, os dados foram comparados por meio do teste de Tukey.

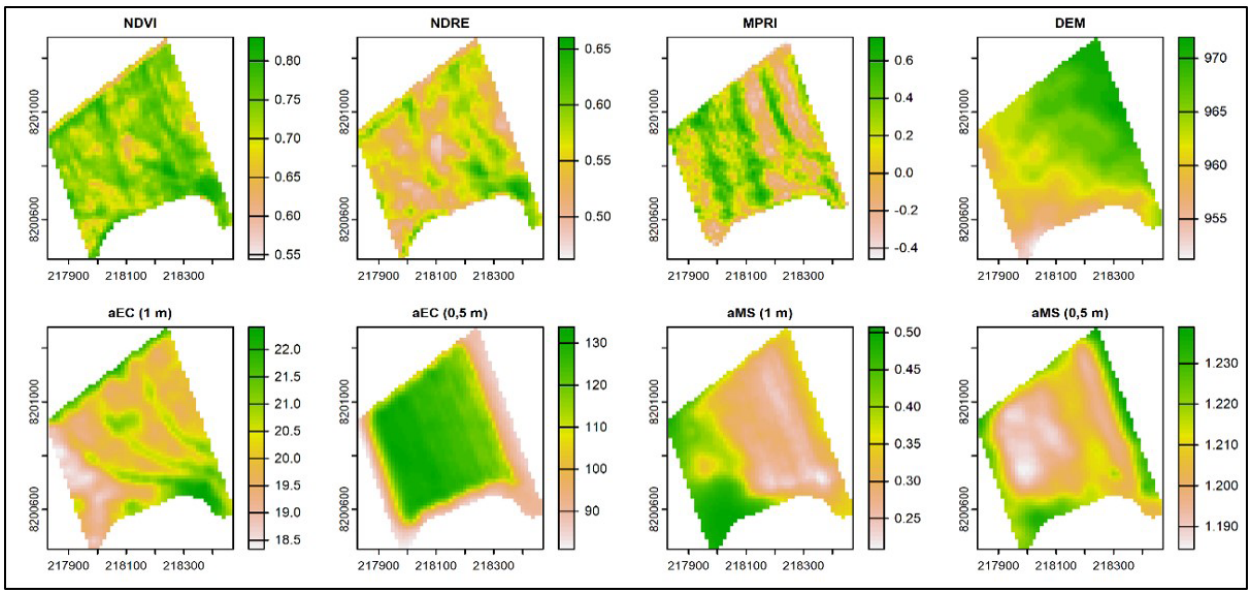


Figura 1. Covariáveis utilizadas para modelagem dos dados de produtividade do algodoeiro. Fazenda Pamplona, Cristalina, GO, safra 2018/2019.

Após o mapeamento pelo sensor EM38-MK2, os dados de CEa e SMa foram avaliados quanto à distribuição dos valores para observação da normalidade. Em seguida foram ajustados semivariogramas experimentais e empíricos para caracterização da dependência espacial das propriedades do sensor utilizando as funções presentes no pacote *gstat* (Pebesma; Benedikt, 2022) do software *R* (R Core Team, 2021). Após ajustes, utilizou-se a interpolação por krigagem ordinária (KO), usando a função *krige* presente no *R* (R Core Team, 2021). A representação da topografia da área de estudo foi obtida por meio do modelo digital de elevação (MDE). Portanto, além das três imagens dos IVs (NDVI, NDREb e, MPRI), e mapas do sensor EM38-MK2, foi usada também a imagem do MDE (raster), representando a topografia. Assim foram totalizadas oito covariáveis para predição da produtividade. A regressão *stepwise* foi utilizada para identificar o agrupamento de covariáveis usadas para evitar multicolinearidade no modelo GLMM.

Foram usados dois algoritmos para prever o rendimento do algodoeiro. 1) Regressão Linear Múltipla Generalizada (GLMM) e 2) *Random Forest* (RF). Em todos os casos, o valor da produtividade do algodoeiro foi a variável dependente. GLMM é a abordagem mais simples e rápida utilizada no estudo. A GLMM se encaixa em um modelo linear com coeficientes para minimizar a soma residual de quadrados entre os alvos observados no conjunto de dados e as metas previstas pela aproximação linear. Esses modelos foram ajustados usando o pacote *caret* do *R*.

Os dados de produtividade de algodão também foram espacializados em função da dependência espacial caracterizada pelos parâmetros dos semivariogramas utilizando KO pelo *gstat*. O mapa gerado serviu como referência para comparação qualitativa, bem como para as avaliações quantitativas.

Os dados de rendimento de campo observados e previstos em todos os modelos foram comparados utilizando-se índices estatísticos relativos à exatidão e precisão. A exatidão indica a proximidade de uma estimativa do valor observado, em que foi avaliada utilizando-se a Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE em inglês) dado na mesma unidade da variável prevista, nesse caso em t ha^{-1}.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_{obs_i} - Y_{est_i}\right)^2}{n}} \quad (4)$$

Em que: n é o número de dados, Y_{est_i} é o valor de rendimento estimado pelo algoritmo, e Y_{obs_i} é o rendimento real.

A precisão é a capacidade de um modelo repetir uma estimativa, em que foi avaliada utilizando-se o coeficiente ajustado de determinação R^2 (R Core Team, 2021), apresentado na equação abaixo.

$$R^2 ajustado = 1 - \left[\frac{\left(1 - R^2\right)(n-1)}{n-k-1}\right] \quad (5)$$

Em que: n são os pontos no conjunto de dados, k é o número de regressores; R^2 é o coeficiente de determinação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As covariáveis utilizadas para a modelagem dos dados de produtividade de algodão são apresentadas na Figura 1. O modelo digital de elevação apresenta os menores valores para a região sudoeste do mapa, em congruência com os maiores valores de aMS (ou SMa em português) usando a bobina de 1,0 m. Já a covariável aEC (ou CEa) obtida por bobina de 0,5 m expressa os maiores valores ao centro do mapa, podendo estar associado às camadas superficiais do solo. Esses padrões, que se assemelham a "ranhuras", podem estar associados às curvas de nível construídas na área estudo como uma das práticas utilizadas para conservação do solo.

Os valores entre a propriedade SMa para as duas bobinas são bem distintos. A bobina de medição rasa apresenta valores entre 1000 ppt e 1250 ppt, relacionados à umidade, enquanto o valor máximo para a bobina profunda foi de 0,5 ppt. Na Figura 2 são apresentados os semivariogramas utilizados para caracterizar a dependência espacial dos atributos medidos pelo sensor EM38-MK2.

Somente a propriedade CEa 1,0 m apresentou alcance menor que 200 m. As outras propriedades apresentaram valores de alcance de cerca de 400 m a 500 m.

Para evitar multicolinearidade, foi usado o algoritmo *regsubset*, e o maior valor de R^2 dentre as possíveis combinações foi utilizado para o GLMM. Como resultado, as covariáveis selecionadas foram NDVI, NDREb, MPRI, SMa (1,0 m), SMa (0,5 m) e o MDE.

Os dados de SMa e CEa rasas foram os que mais influenciaram a modelagem da produtividade do algodoeiro com RF. O índice MPRI foi o IV mais importante para predição. A partir da interpretação da modelagem via RF, o MDE não apresentou influência para a modelagem, em razão da pequena diferenciação de elevação na área de estudo.

Na Figura 3 é possível observar os mapas de produtividade do algodoeiro espacializados por três métodos: mapa por KO e mapas usando os modelos *GLMM* e *Random Forest*. A partir do mapa de KO, foi possível identificar a existência dos maiores valores de produtividade (áreas com vermelhos), bem como os valores intermediários (laranja a salmão).

Os valores de produtividade do algodoeiro a partir dos dados originais, interpolados por KO e preditos por GLMM e RF, são apresentados na Tabela 2. É possível observar que somente o GLMM apresenta valores mínimos menores que os valores mínimos medidos. A partir dos valores médios, é possível observar que todos apresentaram valores similares em torno de 5 ton. O RF foi o que apresentou menores valores de desvio-padrão e curtoses, quando comparado ao GLMM.

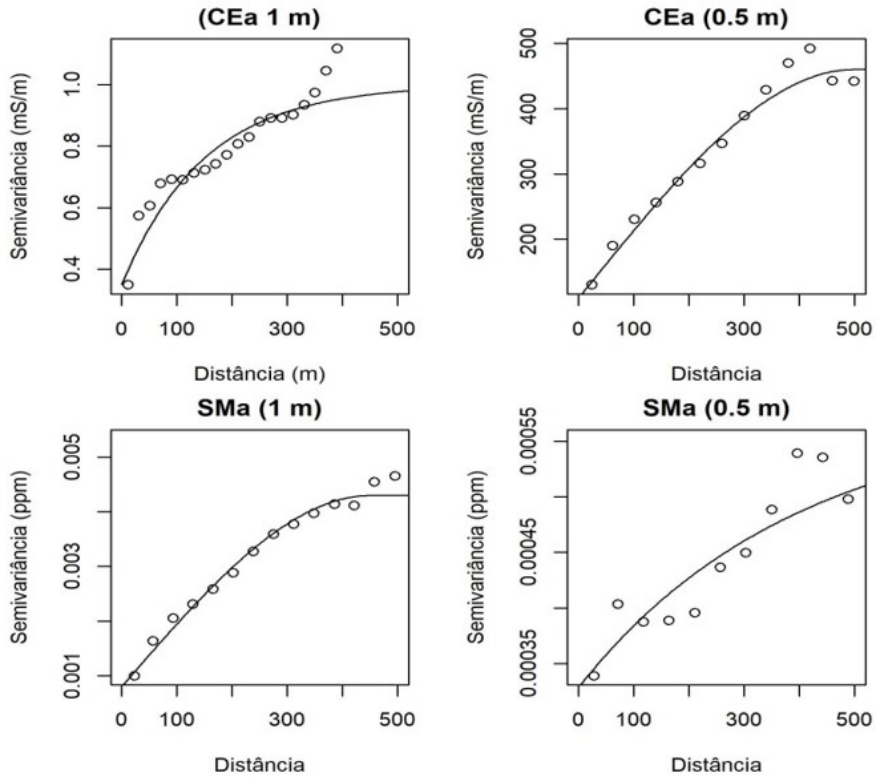


Figura 2. Semivariogramas experimentais (círculos) e ajustados (linhas) para os dados dos atributos da CEa (ou aEC em inglês) e SMa (ou aMS) utilizando as duas bobinas, 0,5 m e 1,0 m. Fazenda Pamplona, Cristalina, GO, safra 2018/2019.

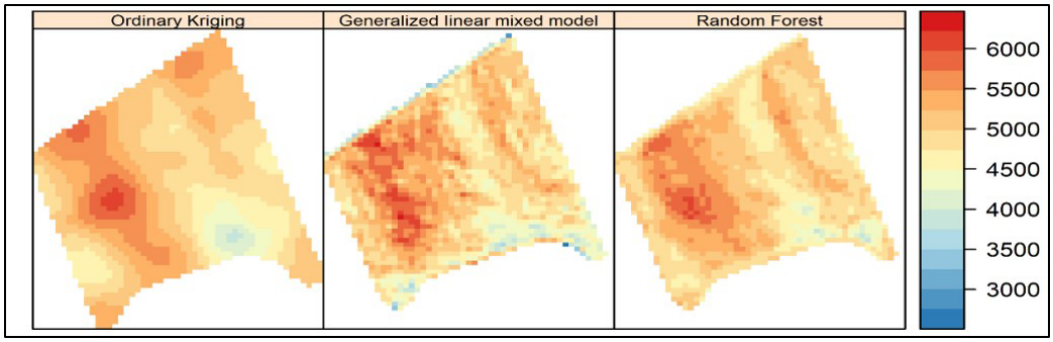


Figura 3. Mapas de produtividade de algodão obtidos, da esquerda para direita: por Krigagem Ordinária (mapa de referência); usando Modelos lineares generalizados; e *Random Forest*. Fz. Pamplona, GO. Safra: 2018/2019.

Tabela 2. Produtividade de algodão, interpolada por KO; predita por GLMM e RF. Fz Pamplona. Safra 2018/2019.

	Produtividade do algodoeiro	Krigagem Ordinária	Modelo linear generalizado misto	Random Forest
Mínimo	3142.30	3912.86	2750.68	3873.16
Máximo	6380.20	6054.02	6222.51	6090.51
Média	5065.15	5091.09	5018.38	5055.33
Mediana	5061.30	5076.34	5022.10	5008.53
Variância	330119.78	141437.60	224837.60	125329.10
Desvio-Padrão	574.56	376.08	474.17	354.02
Assimetria	-0.13	-0.09	-0.32	0.18
Curtose	0.40	0.06	0.56	-0.11

Os mapas obtidos via algoritmos de *Machine Learning* apresentaram valores de ajuste e erro de validação cruzada superiores ao método de krigagem ordinária que foi utilizado como referência. Dentre os modelos testados neste trabalho, o que apresentou melhor performance foi o GLMM com valores de R^2 de 0,42 e RMSE de 435,73 kg ha^{-1}.

O mapa de referência via KO apresentou R^2 e RMSE de 0,32 e 472 kg ha^{-1}, respectivamente, enquanto para RF, R^2 e RMSE foram de 0,40 e 444 kg ha^{-1}. As propriedades dos sensores proximais (CEa e SMa) para a profundidade rasa, além do índice MPRI obtido por VANT, foram significativamente mais importantes.

4 CONCLUSÕES

O uso de covariáveis ambientais diretamente correlacionadas à variável alvo forneceu um mapa de produtividade do algodoeiro com menor erro.

Os algoritmos de *machine learning* (modelos lineares generalizados mistos e *Random Forest*) apresentaram métricas superiores à interpolação via krigagem ordinária para o mapeamento da produtividade do algodoeiro.

Os dados de sensores proximais de solos obtidos pelo sensor EM38-MK2 foram fundamentais para mapear a produtividade de algodão. Os índices de vegetação NDVI, MPRI e NDREb foram significativamente importantes fornecendo dados correlacionados à produtividade do algodoeiro.

REFERÊNCIAS

BADNAKHE, M. R.; DESHMUKH, P. R. An application of k-means clustering and artificial intelligence in pattern recognition for crop diseases. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCEMENTS IN INFORMATION TECHNOLOGY WITH WORKSHOP OF ICBMG, 2011, Singapura. **IPCSIT**. Singapura: IACSIT Press, 2011.

BARNES, E. M.; CLARKE, T.R.; RICHARDS, S.E.; COLAIZZI, P. Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, Bloomington. **Proceedings [...]**. Bloomington: International Society of Precision Agriculture, 2000.

BRADOW, J. M.; WARTELLE, L.H.; BAUER, P.J.; SASSENRATH-COLE, G.F. Smallsample cotton fiber quality quantitation. **Journal of Cotton Science**, v. 1, p. 48-60, 1997.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 1997. 212 p.

FUE, K. G.; PORTER, W. M.; RAINS, G. C. Deep learning based real-time GPU-accelerated tracking and counting of cotton bolls under field conditions using a moving camera. In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2018. **ASABE Annual International Meeting 1800831**. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2018. DOI: https://doi.org/10.13031/aim.201800831.

HEIL, K.; SCHMIDHALTER, U. The application of EM38: determination of soil parameters, selection of soil sampling points and use in agriculture and archaeology. **Sensors**, v. 17, n. 11, p. 2540, 2017. DOI: http://doi.org/10.3390/s17112540.

JOHN DEERE. **Colhedora de Algodão CP690**, 2022. Disponível em: https://www.deere.com.br/pt/colheitadeiras/colhedora-de-algodão-cp690/. Acesso em: 12 jun. 2022.

PEBESMA, E.; BENEDIKT, G. **Spatial and spatio-temporal geostatistical modelling, prediction and simulation**. The R Journal. GitHub, 2022. Disponível em: https://github.com/r-spatial/gstat/. Acesso em: 12 jun. 2022.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statisticalcomputing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021. Disponível em: https://www.R-project.org. Acesso em: 11 dez. 2021.

SENTINEL-2. **Sentinel-2 Online, MSI User Guide**. Sentinels, 2022. Disponível em: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi. Acesso em: 25 jul. 2022.

SINGH, A.; GANAPATHYSUBRAMANIAN, B.; SINGH, A.K.; SARKAR, S. Machine learning for high-throughput stress phenotyping in plants. **Trends in Plant Science**, v. 21, n. 2, p. 110-124, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.10.015.

SINGH, N.; TEWARI, V.K.; BISWAS, P.K.; DHRUW, L.K.; PAREEK, C.M.; SINGH, H.D.D. Semantic segmentation of in-field cotton bolls from the sky using deep convolutional neural networks. **Smart Agricultural Technology**, v. 2, n. 100045, 2022.

YANG, Z.; WILLIS, P.; MUELLER, R. Impact of band-ratio enhanced AWIFS image to crop classification accuracy. In: PECORA – THE FUTURE OF LAND IMAGING, 2008, Denver. **Proceedings [**...] Maryland: ASPRS, 2008.

YEOM, J.; JUNG, J.; CHANG, A.; MAEDA, M.; LANDIVAR, J. Automated open cotton boll detection for yield estimation using Unmanned Aircraft Vehicle (UAV) Data. **Remote Sensing**, v.10, n. 1895. 2018.

31

Variabilidade espacial de fatores que afetam a produtividade de milho-soja no Cerrado

Spatial variability of factors that affect corn-soybean yield in the Brazilian Savanna

Marina de Fátima Vilela[1], Luciano Shozo Shiratsuchi[2], Sandro Manuel Carmelino Hurtado[3], Edemar Joaquim Corazza[4], Juaci Vitória Malaquias[5]

[1] *Pesquisadora, Embrapa Cerrados, Planaltina (DF), Brasil, marina.vilela@ embrapa.br,*
[2] *Professor, Louisiana State University, Baton Rouge, EUA, lshiratsuchi@agcenter.lsu.edu*
[3] *Professor, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia (MG), Brasil, sandro.hurtado@ufu.br*
[4] *Pesquisador, Editor-Chefe da Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira (PAB), Embrapa Sede, Brasília (DF), Brasil, edemar.corazza@embrapa.br*
[5] *Analista, Embrapa Cerrados, Planaltina (DF), Brasil, juaci.malaquias@embrapa.br*

RESUMO

Dados de produtividade de milho e de soja, de condutividade elétrica, de fertilidade, de fotografias aéreas, de nematoides, de análise foliar e de altimetria de precisão foram coletados em Planaltina de Goiás – GO, no período de 2010 a 2012. Os dados foram analisados por meio da Análise de Componentes Principais (ACP) e apresentaram um baixo poder explicativo da variabilidade da produtividade de milho e de soja na área, embora a fertilidade, a textura e a elevação tenham sido as variáveis que mais contribuíram para a explicação da variabilidade total dos dados na primeira e na segunda dimensão. Para analisar o efeito da textura e das posições do relevo na produtividade, foram analisados os dados das safras de soja 2019/2012 e 2020/2021, totalizando 225.795 e 241.884 pontos, respectivamente. Os resultados da ACP, aplicados ao novo conjunto de dados mais robusto, mostrou que as variáveis areia total e argila contribuíram para explicar a variabilidade dos dados na primeira dimensão e que a textura do solo se correlaciona às posições do relevo. Os resultados da análise de regressão linear múltipla mostraram que as variáveis areia total e argila contribuem para explicar a produtividade e a sua variabilidade. O desempenho dos modelos ajustados para as safras 2019/2020 e 2020/2021 e o adequado manejo da fertilidade do solo permitiram inferir que a textura do solo é um fator que afeta a produtividade e sua variabilidade na área de estudo, e que a textura do solo se correlaciona às posições do relevo. Desta forma, o mapeamento da textura do solo pode possibilitar a definição e o mapeamento das zonas de manejo.

Palavras-chave: agricultura de precisão; altimetria de precisão; textura; fertilidade; zona de manejo.

ABSTRACT

Data on corn and soybean yields, electrical conductivity, fertility, aerial photographs, nematodes, leaf analysis, and precision altimetry were collected in Planaltina de Goiás–Go, Brazil. The data were collected from 2010 to 2012. A Principal component analysis (PCA) applied to data showed a low explanatory power of the variability of corn and soybean yields in the area, although fertility, texture, and elevation were the variables that most contributed to the explanation of the total variability of the data in the first and the second dimension. The effect of texture and elevation on productivity were analyzed using data from the 2019/2012 and 2020/2021 soybean harvests. A PCA was applied to the new dataset. The PCA showed that the variables of total sand and clay contributed to explaining the variability of the data in the first dimension and that soil texture correlates with relief positions. The results of multiple linear regression analysis showed that the variables total sand and clay contribute to explaining productivity and its variability. The good performance of the adjusted models for the 2019/2020 and 2020/2021 harvests and the adequate management of soil fertility, allowed inferring that soil texture is a factor that affects productivity and its variability, and soil texture correlates to relief positions. In this way, soil texture mapping can enable the definition and mapping of management zones.

Keywords: precision agriculture; precision altimetry; texture; fertility; management zone.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000018

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

A variabilidade espacial dos fatores que afetam a produtividade (Mulla; Schepers, 1997; Coelho, 2003; Machado et al., 2004; Oliveira et al., 2005a; Machado et al., 2005; Resende et al., 2006) possibilita a definição de zonas de manejo (Molin, 2002; Araújo, 2004; Luchiari Júnior, et al., 2004; Santos, 2017) como estratégia viável à implementação da agricultura de precisão em escala comercial no Brasil.

Esforços têm sido empregados para caracterizar a variabilidade espacial dos fatores que afetam a produção (Coelho, 2003; Machado et al., 2004; Oliveira et al., 2005a; Machado et al., 2005; Resende et al., 2006). Critérios baseados em características topográficas da área, atributos do solo, mapas de produtividade, mapas de condutividade elétrica, histórico da área, infestações por pragas e doenças, além de critérios conjugados, podem ser utilizados para orientar a delimitação de zonas de manejo e os locais para as amostragens de interesse (Lamb; Brown, 2001; Chang et al., 2004; Koger et al., 2004; Luchiari Júnior, et al., 2004; Oliveira et al., 2005a, b; Vilela et al., 2005;).

Neste contexto, procedimentos que permitam reduzir o tempo entre as etapas de monitoramento, diagnóstico e intervenção, otimizando os custos com amostragens e análises, podem promover a AP no Cerrado, proporcionando benefícios econômicos sociais e ambientais. A definição de procedimentos para detecção de zonas contrastantes de desenvolvimento/ produtividade das culturas (fotografias aéreas de grande escala, mapas de produtividade, sensor de altura de plantas), associados a amostragens e diagnósticos direcionados dessas zonas, constitui-se numa abordagem promissora para delineamento e manejo localizado em zonas nos talhões. Essa abordagem tem uma lógica de monitoramento baseada na existência de diferenças de comportamento da própria cultura dentro de uma área de produção e, a partir dessas diferenças, é que se busca estabelecer o diagnóstico do(s) fator(es) condicionante(s) e subsidiar a adoção de manejo localizado, inclusive com a possibilidade de viabilizar intervenções durante a fase de desenvolvimento da cultura em determinadas situações.

Considerando-se o cenário da agricultura no Cerrado, as informações apresentadas e a atual condição tecnológica do Brasil em termos de maquinário e equipamentos para AP, foram efetuados estudos em sistema comercial de produção milho-soja no Cerrado, objetivando analisar a variabilidade espacial dos fatores que afetam a produção de soja e de milho, possibilitando a definição e o mapeamento de zonas de manejo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na Fazenda Lambary, município de Planaltina – GO com altitude média de 1.000 m, solo predominante Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de textura argilosa, clima tipo Aw com presença de invernos secos e verões chuvosos, segundo a classificação de Köppen, e precipitação pluvial média anual de 1.500 mm com chuvas concentradas de outubro a março.

A atividade agrícola na área iniciou-se com a retirada da vegetação nativa seguida de preparo convencional do solo (aração seguida por gradagem). A partir de 1990, adotou-se o sistema de plantio direto priorizando o cultivo do milho e da soja, sendo o milho, após 2006, cultivado no sistema de integração lavoura-pecuária, em consórcio com *Brachiaria ruziziensis* para produção de forragem e pastejo na entressafra.

O estudo foi inicialmente realizado durante as safras 2010/2011 (milho híbrido simples Pioneer P3862H) e 2011/2012 (soja cultivar Pioneer P98Y11) em uma área de 54 ha, inserida num talhão de 371,82 ha (Figura 1). A adubação obedeceu às recomendações das análises química e de fertilidade do solo.

Amostras de solo, de raiz e de folhas foram coletadas em uma malha de 100 m x 100 m para análise de nematoides de solo e de raiz, atributos químicos de solo e de planta, textura/granulometria. A produtividade de grãos foi obtida por colhedora equipada com o monitor PF Advantage com sensor de umidade e fluxo de grãos e GPS (Teejet® e-dif), posteriormente filtrados, e sua umidade corrigida para 13% (Menegatti; Molin, 2004). Os dados de condutividade elétrica aparente do solo (CE) foram obtidos em 02/11/2011 por meio do sensor VERIS (Veris Technologies, 2011), nas profundidades de 0-0,3 m e 0-0,9 m.

Fotografias aéreas não convencionais foram obtidas no início da floração das safras 2010/2011 e 2011/2012, empregando câmera digital embarcada em ultraleve a uma altura média de voo de 500 metros. As fotografias compuseram os mosaicos aerofotogramétricos, os quais foram geometricamente corrigidos e posteriormente classificados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise de componentes principais (ACP) (Le; Josse; Husson, 2008), aplicada aos dados de rendimento de grãos, nematoides de solo e de raiz, atributos químicos de solo e de planta, textura/granulometria e condutividade elétrica aparente do solo para as safras 2010/2011 (milho) e 2011/2012 (soja), apresentou autovalores próximos a 40% nas dimensões 1 e 2, mostrando que as variáveis analisadas revelaram um

Figura 1. Visão aérea da área de estudo. Fotografia: Acervo de Agricultura de Precisão – Embrapa Cerrados.

baixo poder explicativo da variabilidade total dos dados para milho e para soja (Figura 2).

Na Figura 2, safra de milho 2010/2011, observa-se uma relação direta entre presença de nematoide e areia, como também observado por Endo (1959), Salgado et al. (1966), Jordaan et al. (1989), Dias et al. (2010) e Debiasi et al. (2018). Solos mais arenosos facilitam a movimentação dos nematoides durante seu ciclo de vida no solo (Arévalo Gardini et al., 2007; Goulart, 2008; Francilino, 2016). Os nematoides se movimentam através dos poros do solo por meio dos filmes de água que cobrem as partículas de solo sem a necessidade de construção de túnel (Bongers; Ferris, 1999; Francilino, 2016), dessa forma, as plantas geralmente sofrem mais danos causados pelo nematoide em solos arenosos do que em solos de textura mais fina (Francilino, 2016).

Segundo Salgado et al. (1966) a alta porcentagem de areia favorece as relações patógeno-hospedeiro no início, porém, com o tempo, este efeito não é mais notado. A afirmativa de Salgado et al. (1966), foi observada na área de estudo, sobretudo nas manchas de solo com textura média, do latossolo vermelho-amarelo distrófico de textura argilosa predominante. Dessa forma, observou-se que a presença de nematoides não afetou, de forma relevante, a produtividade de milho e de soja na área de estudo.

No gráfico B, Figura 2, observa-se relação direta entre areia, fósforo (P) e produtividade de soja. A produtividade pode estar associada à disponibilidade de P em função da textura, conforme Souza e Lobato (2004). A relação direta entre areia e produtividade de soja pode estar associada à drenagem de água e à

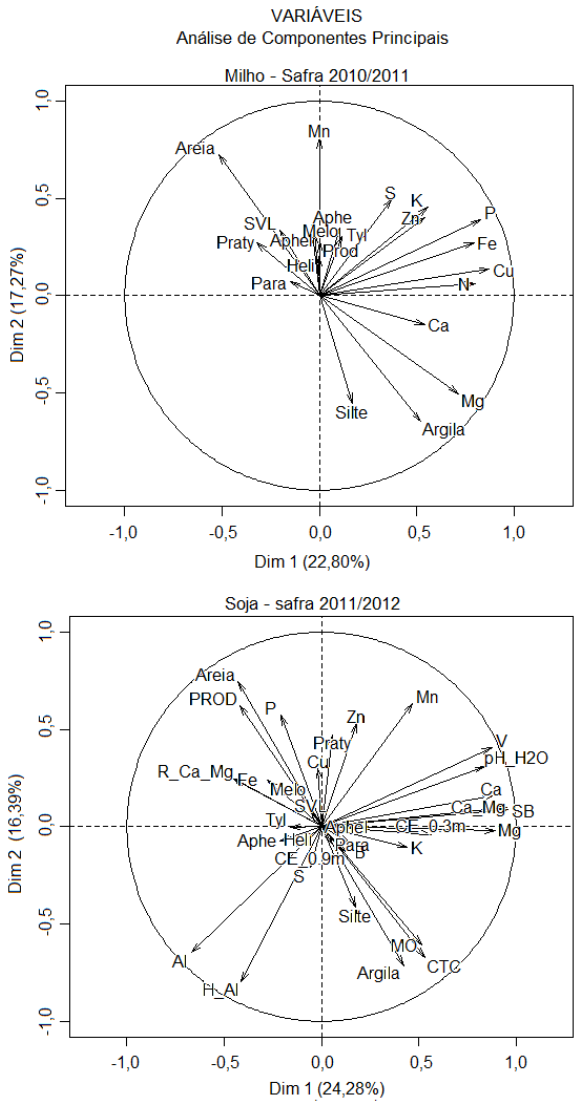


Figura 2. Variáveis obtidas por meio da análise de componentes principais para milho e soja, safras 2010/2011 e 2011/2012, respectivamente.

aeração no solo, mais favorável nas manchas de textura média de um solo de textura argilosa predominante, o que deve ser analisado e comprovado em safras posteriores.

As classes de coloração da vegetação (cultura), obtidas pelas fotografias aéreas, não apresentou relação com a produtividade, apesar de a coloração amarelada ter apresentado uma ligeira relação com as baixas produtividades. Os dados em respeito à coloração da cultura e sua relação com a produtividade pode indicar um erro metodológico na aquisição das fotografias aéreas, sobretudo com relação à faixa do espectro eletromagnético empregada e a data de aquisição próxima à floração.

Buscando entendimento dos fatores que afetam a produtividade e sua variabilidade na área, a altimetria de precisão para mapeamento das posições do relevo, representada pela elevação, foi incorporada à base de dados da safra de milho (2010/2011) e de soja (2011/2012) para nova análise.

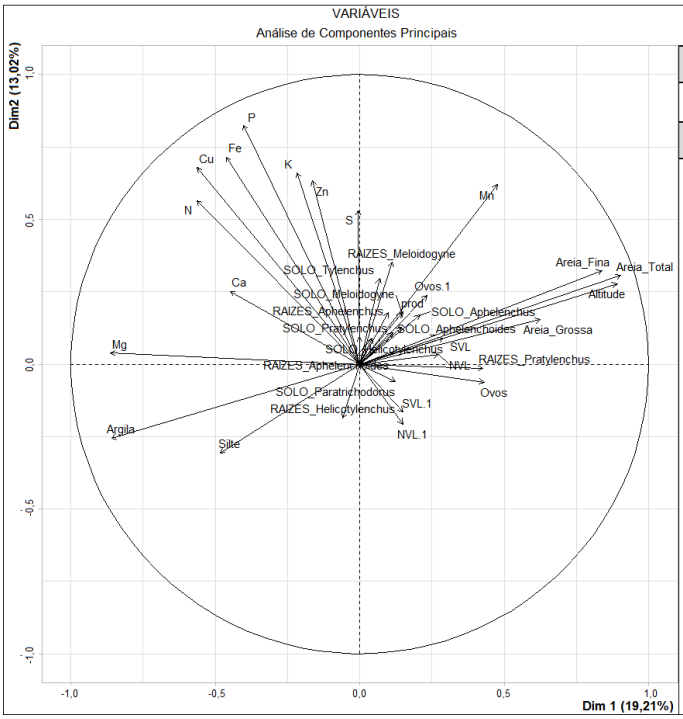
A nova ACP para os dados da safra milho (2010/2011), realizada com a incorporação da altimetria de precisão, apresentou autovalor de 32,23% nas dimensões 1 e 2, o que significou um poder explicativo para a variabilidade dos dados para milho, ainda mais baixo com a incorporação da altimetria de precisão, representada pela variável elevação (Figura 3). Para a safra de soja, a ACP apresentou um autovalor de 39,53% (Figura 4), com autovalores similares aos obtidos sem a incorporação da variável elevação.

Os gráficos de variáveis permitiram observar a relação direta entre a elevação e o atributo areia, para a safra de milho 2010/2011 (Figura 3), e a relação direta entre elevação, areia e P para a safra da soja 2011/2012 (Figura 4). É possível observar a relação da areia e da elevação com diferentes espécies de nematoides, para ambas safras.

Apesar do baixo poder explicativo das variáveis, a fertilidade do solo, a textura e a elevação foram as variáveis que mais contribuíram para a explicação da variabilidade total dos dados na primeira e na segunda dimensão.

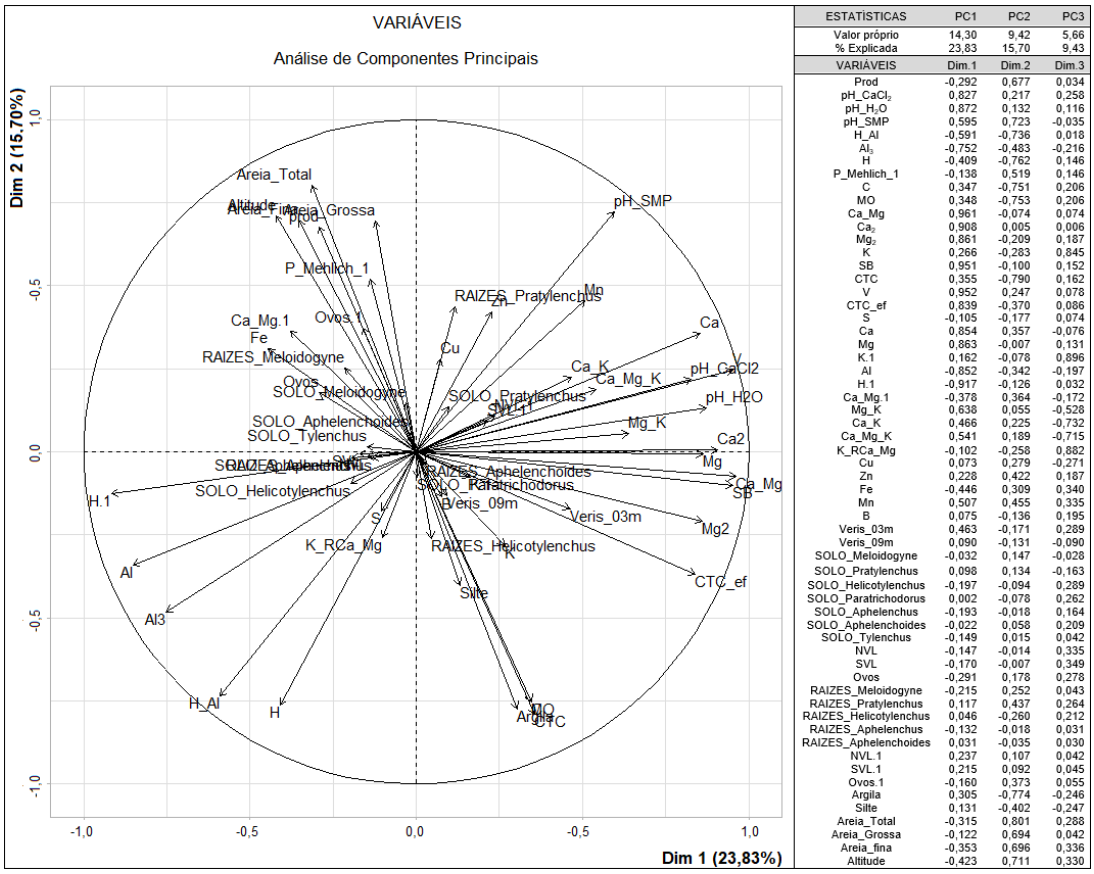
O baixo poder explicativo das variáveis relacionadas à fertilidade do solo pode estar relacionado ao manejo da fertilidade empregado na área, que resultou em níveis de fertilidade superior àqueles exigidos pelas culturas, conforme Sousa e Lobato (2004). Dessa forma, a fertilidade, em função do manejo empregado nesta área, não constituiu um fator de variabilidade ou limitante à produtividade na área.

Para avaliar a textura e a elevação como fatores que explicam a variabilidade da produtividade da área, uma nova ACP foi aplicada as variáveis produtividade, areia total, argila, silte e elevação para as safras de milho (2010/2011) e soja (2011/2012). A ACP resultou em autovalor, nas dimensões 1 e 2, de 84,04% e 90,23% para as safras de milho (2010/2011) e de soja (2011/2012), respectivamente. Os resultados obtidos mostraram que as variáveis elevação, areia total e ar-



Estatísticas	PC1	PC2	PC3
Valor próprio	6,72	4,56	3,65
% Explicada	19,21	13,02	10,43
Variáveis	**Dim.1**	**Dim.2**	**Dim.3**
Prod	0,151	0,180	0,151
SOLO_Meloidogyne	0,146	0,178	-0,379
SOLO_Pratylenchus	-0,001	0,094	0,012
SOLO_Helicotylenchus	0,114	0,108	0,565
SOLO_Paratrichodorus	0,124	-0,060	0,205
SOLO_Aphelenchus	0,208	0,169	-0,006
SOLO_Aphelenchoides	0,145	0,129	0,131
SOLO_Tylenchus	0,068	0,296	0,286
NVL	0,273	0,033	0,633
SVL	0,289	0,089	0,653
Ovos	0,432	-0,062	0,358
RAIZES_Meloidogyne	0,113	0,353	-0,148
RAIZES_Pratylenchus	0,427	-0,014	0,127
RAIZES_Helicotylenchus	-0,058	-0,185	0,516
RAIZES_Aphelenchus	0,100	0,177	0,574
RAIZES_Aphelenchoides	0,043	0,090	0,654
NVL.1	0,150	-0,207	0,478
SVL.1	0,150	-0,165	0,573
Ovos.1	0,233	0,236	-0,056
Argila	-0,858	-0,255	0,242
Silte	-0,484	-0,306	-0,055
Areia_Total	0,904	0,306	-0,204
Areia_Grossa	0,624	0,155	-0,192
Areia_fina	0,838	0,322	-0,193
N	-0,564	0,565	0,026
P	-0,404	0,825	0,049
K	-0,217	0,662	0,106
Ca	-0,448	0,251	-0,035
Mg	-0,862	0,038	0,059
S	-0,006	0,530	0,456
Cu	-0,562	0,678	-0,101
Fe	-0,462	0,715	-0,007
Mn	0,476	0,620	-0,015
Zn	-0,163	0,633	0,002
Altitude	0,891	0,279	-0,179

Figura 3. Variáveis obtidas por meio da análise de componentes principais para milho (safra 2010/2011), e contribuição das variáveis analisadas em cada dimensão.



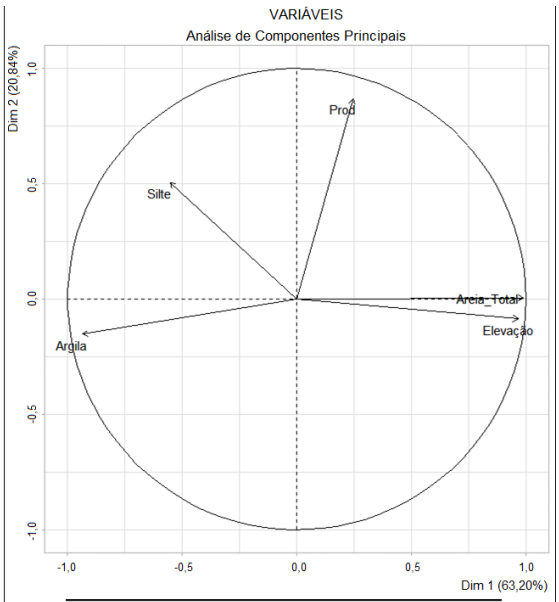
ESTATÍSTICAS	PC1	PC2	PC3
Valor próprio	14,30	9,42	5,66
% Explicada	23,83	15,70	9,43
VARIÁVEIS	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Prod	-0,292	0,677	0,034
pH_CaCl2	0,827	0,217	0,258
pH_H2O	0,872	0,132	0,116
pH_SMP	0,595	0,723	-0,035
H_Al	-0,591	-0,736	0,018
Al3	-0,752	-0,483	-0,216
H	-0,409	-0,762	0,146
P_Mehlich_1	-0,138	0,519	0,146
C	0,347	-0,751	0,206
MO	0,348	-0,753	0,206
Ca_Mg	0,961	-0,074	0,074
Ca2	0,908	0,005	0,006
Mg2	0,861	-0,209	0,187
K	0,266	-0,283	0,845
SB	0,951	-0,100	0,152
CTC	0,355	-0,790	0,162
V	0,952	0,247	0,078
CTC_ef	0,839	-0,370	0,086
S	-0,105	-0,177	0,074
Ca	0,854	0,357	-0,076
Mg	0,863	-0,007	0,131
K.1	0,162	-0,078	0,896
Al	-0,852	-0,342	-0,197
H.1	-0,917	-0,126	0,032
Ca_Mg.1	-0,378	0,364	-0,172
Mg_K	0,638	0,055	-0,528
Ca_K	0,466	0,225	-0,732
Ca_Mg_K	0,541	0,189	-0,715
K_RCa_Mg	-0,102	-0,258	0,882
Cu	0,073	0,279	-0,271
Zn	0,228	0,422	0,187
Fe	-0,446	0,309	0,340
Mn	0,507	0,455	0,335
B	0,075	-0,136	0,195
Veris_03m	0,463	-0,171	0,289
Veris_09m	0,090	-0,131	-0,090
SOLO_Meloidogyne	-0,032	0,147	-0,028
SOLO_Pratylenchus	0,098	0,134	-0,163
SOLO_Helicotylenchus	-0,197	-0,094	0,289
SOLO_Paratrichodorus	0,002	-0,078	0,262
SOLO_Aphelenchus	-0,193	-0,018	0,164
SOLO_Aphelenchoides	-0,022	0,058	0,209
SOLO_Tylenchus	-0,149	0,015	0,042
NVL	-0,147	-0,014	0,335
SVL	-0,170	-0,007	0,349
Ovos	-0,291	0,178	0,278
RAIZES_Meloidogyne	-0,215	0,252	0,043
RAIZES_Pratylenchus	0,117	0,437	0,264
RAIZES_Helicotylenchus	0,046	-0,260	0,212
RAIZES_Aphelenchus	-0,132	-0,018	0,031
RAIZES_Aphelenchoides	0,031	-0,035	0,030
NVL.1	0,237	0,107	0,042
SVL.1	0,215	0,092	0,045
Ovos.1	-0,160	0,373	0,055
Argila	0,305	-0,774	-0,246
Silte	0,131	-0,402	-0,247
Areia_Total	-0,315	0,801	0,288
Areia_Grossa	-0,122	0,694	0,042
Areia_fina	-0,353	0,696	0,336
Altitude	-0,423	0,711	0,330

Figura 4. Variáveis obtidas por meio da análise de componentes principais para soja (safra 2011/2012), e contribuição das variáveis analisadas em cada dimensão.

gila contribuíram para explicar a variabilidade dos dados na primeira dimensão, bem como uma relação direta das variáveis areia total e elevação (Figuras 5 e 6).

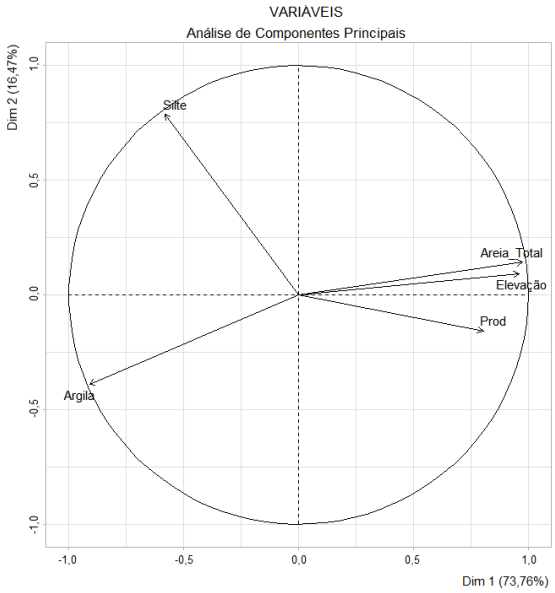
Para comprovar a textura e elevação como fatores que explicam a variabilidade da produtividade na área, novas análises foram realizadas para a safra de soja 2019/2020 e 2020/2021. Os dados de produtividade e de elevação foram coletados em toda a extensão do talhão de 371,82 ha, por meio de colhedora equipada com sensor de umidade e fluxo de grãos e GPS (Teejet® e-dif), totalizando 225.795 e 241.884 pontos de coleta para as safras 2019/2020 e 2020/2021, respectivamente. Os dados de produtividade e de elevação, devidamente espacializados, foram cruzados com o mapa de textura do solo interpolado, discriminando frações argila, silte e areia total.

Os dados de produtividade, de elevação, de argila, de silte e de areia total, para cada ponto de coleta das safras 2019/2020 e 2020/2021, foram submetidos à ACP. A ACP, aplicada aos dados, resultou num autovalor de 82,51% e 84,68% nas dimensões 1 e 2, para as safras 2019/2020 e 2020/2021, respectivamente. Os autovalores resultantes da ACP nas safras



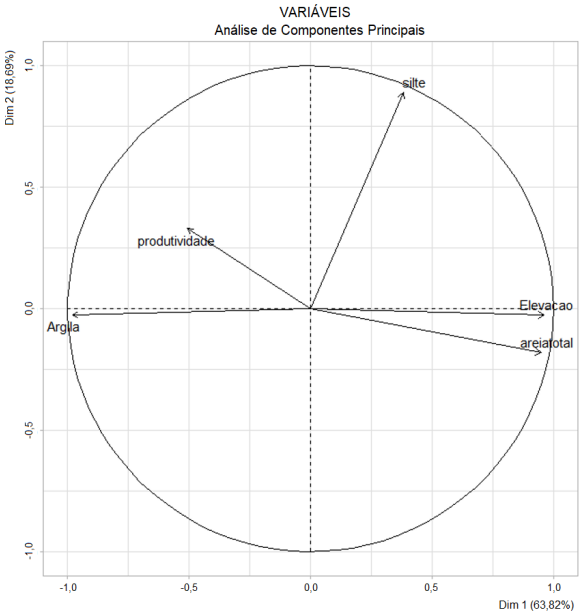
Estatísticas	PC1	PC2	PC3
Valor próprio	3,16	1,04	0,73
% Explicada	63,20	20,84	14,55
Variáveis	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Prod	0,247	0,870	-0,427
Argila	-0,936	-0,152	-0,299
Silte	-0,554	0,505	0,661
Areia_Total	0,990	0,005	0,095
Elevação	0,967	-0,086	0,101

Figura 5. Variáveis obtidas por meio da análise de componentes principais para milho (safra 2010/2011), e contribuição das variáveis produtividade, argila, silte, areia total e elevação analisados em cada dimensão.



Estatísticas	PC1	PC2	PC3
Valor próprio	3,69	0,82	0,41
% Explicada	73,76	16,47	8,28
Variáveis	**Dim.1**	**Dim.2**	**Dim.3**
Prod	0,804	-0,157	0,573
Argila	-0,910	-0,390	0,093
Silte	-0,583	0,786	0,201
Areia_Total	0,974	0,144	-0,140
Elevação	0,961	0,093	-0,128

Figura 6. Variáveis obtidas por meio da análise de componentes principais para soja (safra 2011/2012), e contribuição das variáveis produtividade, argila, silte, areia total e elevação analisados em cada dimensão.



Estatísticas	PC1	PC2	PC3
Valor próprio	3,19	0,93	0,79
% Explicada	63,82	18,69	15,81
Variáveis	**Dim.1**	**Dim.2**	**Dim.3**
Produtividade	-0,507	0,330	0,796
Argila	-0,981	-0,024	-0,157
Silte	0,382	0,890	-0,250
Areia_Total	0,950	-0,181	0,227
Elevação	0,961	-0,026	0,135

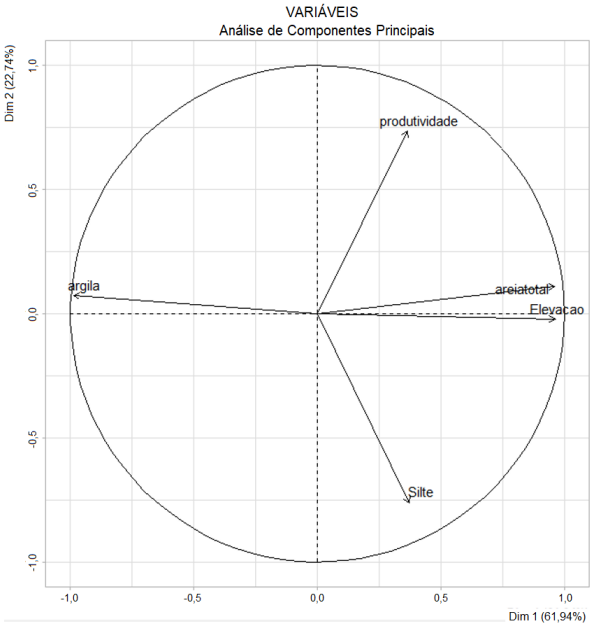
Figura 7. Variáveis obtidas por meio da análise de componentes principais para soja, safra 2019/2020.

2019/2020 e 2020/2021 são próximos aos encontrados nas safras de 2011/2011 e 2011/2012. Os resultados mostraram que as variáveis elevação, areia total e argila contribuíram para explicar a variabilidade dos dados na primeira dimensão tanto para as safras 2011/2011 e 2011/2012 (Figuras 5 e 6), quanto para as safras 2019/2020 e 2020/2021 (Figuras 7 e 8). O mesmo se observou para areia total e elevação, que se mantiveram diretamente relacionadas em todos as safras analisadas.

Para verificar se as variáveis elevação e textura, nas frações argila, silte e areia total, de fato afetam a produtividade, uma análise de regressão linear múltipla (Thioulouse; Dray, 2007) foi aplicada aos dados das safras 2019/2020 e 2020/2021, cujos pressupostos de normalidade dos resíduos foram atendidos (Figura 9).

Os resultados da análise de regressão linear múltipla mostraram que as variáveis elevação, areia total, argila e silte contribuem de fato para explicar o rendimento de grãos e sua variabilidade na área (Tabelas 1 a 4).

O desempenho dos modelos ajustados para as safras 2019/2020 e 2020/2021, considerando produtividade como variável dependente, pode ser observado nas Figuras 10 e 11.



Estatísticas	PC1	PC2	PC3
Valor próprio	3,10	1,14	0,68
% Explicada	61,94	22,74	13,56
Variáveis	**Dim.1**	**Dim.2**	**Dim.3**
Produtividade	0,365	0,735	0,572
Argila	-0,987	0,073	0,082
Silte	0,373	-0,761	0,531
Areia_Total	0,950	-0,181	0,227
Elevação	0,962	0,112	-0,218

Figura 8. Variáveis obtidas por meio da análise de componentes principais para soja, safra 2020/2021.

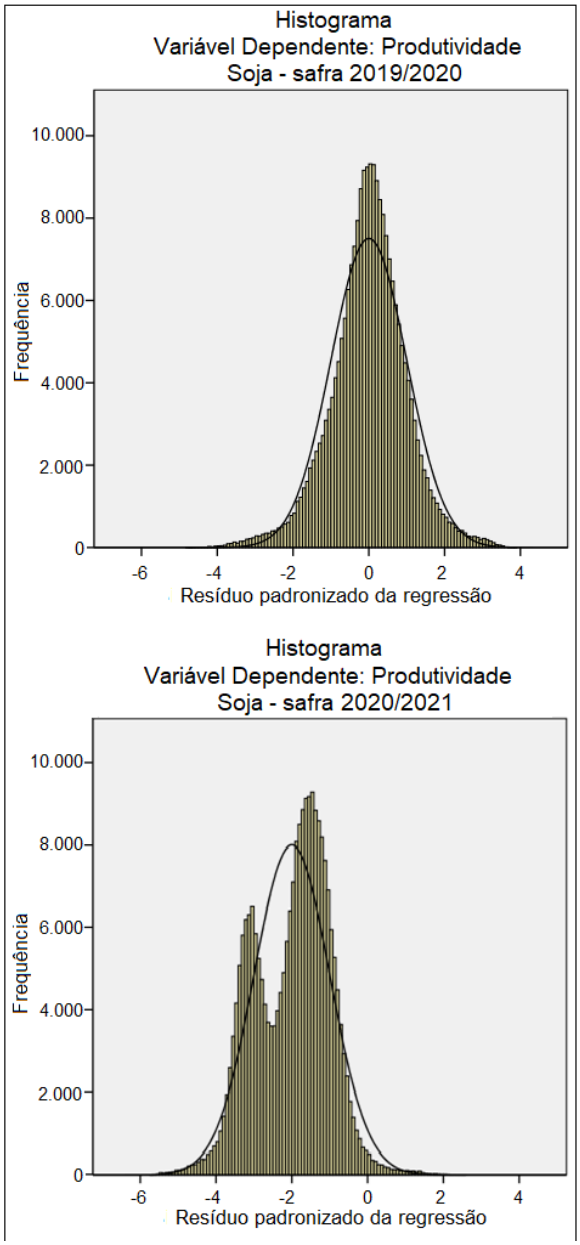


Figura 9. Distribuição de frequência da variável produtividade de soja nas safras 2019/2020 e 2020/2021. A distribuição bimodal na safra 2020/2021 é resultante da utilização de duas cultivares de soja que apresentaram diferentes produtividades.

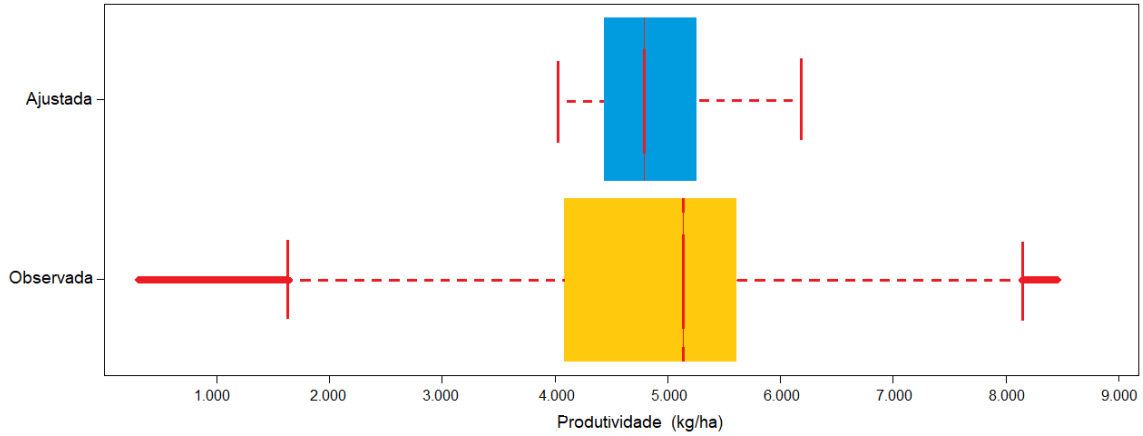


Figura 10. Produtividade observada em campo e produtividade ajustada pelo modelo para soja, safra 2019/2020.

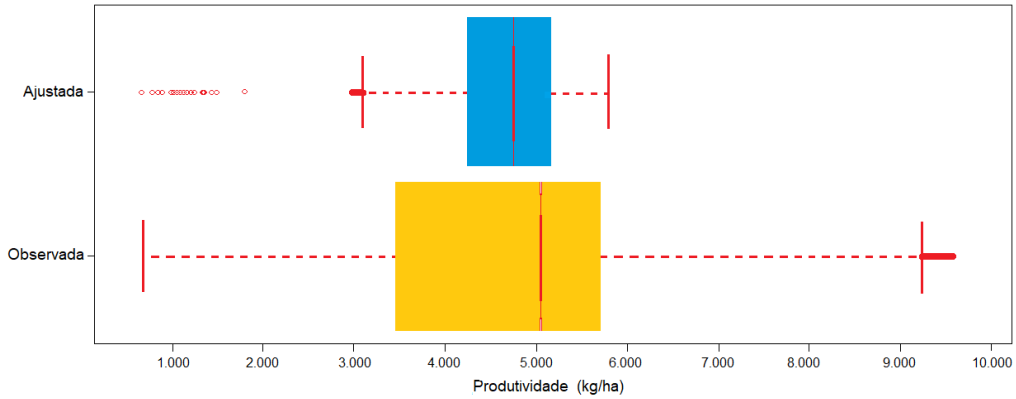


Figura 11. Produtividade observada em campo e produtividade ajustada pelo modelo para soja, safra 2020/2021.

Tabela 1. Análise de variância do modelo ajustado para a safra 2019/2020.

Modelo	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Valor de p
Regressão	11780411,098	4	2945102,775	10493,685	<0,001
Resíduo	63368198,248	225787	280,655		
Total	75148609,346	225791			

Tabela 2. Coeficientes estimados pelo modelo de produtividade ajustado para a safra 2019/2020.

Modelo	Coeficientes não padronizados		Coeficientes padronizados	t	Valor de p	95,0% Intervalo de confiança para B	
	B	Erro padrão	Beta			Limite inferior	Limite superior
(Constante)	-183,997	11,941		-15,409	<0,001	-207,401	-160,594
Elevação	-0,203	0,004	-0,303	-53,551	<0,001	-0,210	-0,196
Silte	0,461	0,010	1,027	44,532	<0,001	0,440	0,481
Areia total	0,456	0,010	4,286	43,633	<0,001	0,435	0,476
Argila	0,468	0,011	4,633	44,005	<0,001	0,447	0,489

Tabela 3. Análise de variância do modelo ajustado para a safra 2020/2021.

Modelo	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Valor de p
Regressão	14502779,232	4	3625694,808	8982,440	<0,001
Resíduo	97632647,687	241879	403,643		
Total	112135426,919	241883			

Tabela 4. Coeficientes estimados pelo modelo de produtividade ajustado para a safra 2020/2021.

Modelo	Coeficientes não padronizados		Coeficientes padronizados			95,0% Intervalo de confiança para B	
	B	Erro padrão	Beta	t	Valor de p	Limite inferior	Limite superior
(Constante)	-404,295	12,367		-32,691	<0,001	-428,534	-380,055
Areia total	0,458	0,011	3,522	39,971	<0,001	0,435	0,480
Argila	0,424	0,012	3,461	36,564	<0,001	0,401	0,447
Silte	0,321	0,011	0,622	28,277	<0,001	0,298	0,343
Elevação	0,048	0,003	0,064	15,399	<0,001	0,042	0,055

4 CONCLUSÕES

O desempenho dos modelos ajustados e o adequado manejo da fertilidade do solo permitem inferir que a textura do solo é um fator que afeta a produtividade e sua variabilidade na área de estudo, e que a textura do solo se correlaciona às posições do relevo. Dessa forma, o mapeamento da textura do solo pode possibilitar a definição e o mapeamento das zonas de manejo.

Tratando-se a área de estudo de uma área de produção comercial, localizada em área *core* do cerrado, é possível que os resultados obtidos neste trabalho possam ser extrapolados para demais áreas de produção com adequado manejo da fertilidade do solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos proprietários da Fazenda Lambary por possibilitar a realização e a continuidade do trabalho.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. C. **Determinação de zonas de manejo e estimativa da produtividade de culturas de grãos por meio de videografia aérea digital multiespectral**. 2004. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004. 101 p.

ARÉVALO GARDINI, E., ZÚÑIGA, C. L.; BALIGAR, V. B.; BAILEY, M. Dinámica poblacional de nematodos asociados al sistema de cultivo tradicional de cacao en la amazonia peruana. In: TALLER PAN- AMAZÓNICO SOBRE BIODIVERSIDAD DEL SUELO. 2007, Rio Branco. **Proceedings [...]**. Rio Branco: PAC, 2007. p. 8.

BONGERS, T., FERRIS, H. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. **Trends in Ecology and Evolution**, 4, n. 6, p. 224-228, 1999.

CHANG, J.; CLAY, S. A.; CLAY, D. E.; DALSTED, K. Detecting weed-free and weed-infested areas of a soybean field using near-infrared spectral data. **Weed Science**, v. 52, n. 4, p. 642-648, 2004.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. **Tópicos em Ciência do Solo**, v.3, p.249-290, 2003.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; DIAS, W. P.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; RAMOS JUNIOR, E. U.; OLIVEIRA JUNIOR, A. Calagem diminui a densidade populacional do nematóide das lesões radiculares em solos com texturas contrastantes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, 8., 2018, Goiânia. **Inovação, tecnologias digitais e sustentabilidade da soja: Anais [...]**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. p. 829-831.

DIAS, W. P.; ASMUS, G. L.; SILVA, J. F. V. Nematoides. In: ALMEIDA, A. M. R.; SEIXAS, C. D. S. (eds.). **Soja**: doenças radiculares e de hastes e inter-relações com o manejo do solo e da cultura. Embrapa Soja: Londrina, 2010. p. 173-206.

ENDO, B. Y. Response of root-lesion nematodes, Pratylenchus brachyurus and P. zeae, to various plants and soil types. **Phytopathology**, v. 49, p. 417-421, 1959.

FRANCILINO, A. H. **Efeito do fluxo de água, estímulo vegetal e volume de poros do solo na mobilidade de Pratylenchus coffeae**. 2016. 46f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2016.

GOULART, A. M. C. **Aspectos gerais sobre nematoides-das-lesões-radiculares (gênero Pratylenchus)**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008. 30 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 219).

JORDAAN, E. M., DE WAELE, D., VAN ROOYEN, P. J. Endoparasitic nematodes in maize roots in the western transvaal as related to soil texture and rainfall. **Journal of Nematology**, v. 21, n. 3, p. 356-360, 1989.

KOGER, C. H.; SHAW, D. R.; REDDY, K. N.; BRUCE, L. M. Detection of pitted morning-glory (Ipomea lacunosa) with hyperspectral remote sensing. II. Efects of vegetation ground cover and reflectance properties. **Weed Science**, v. 52, p. 230-235, 2004.

LAMB, D. W.; BROWN, R. B. Remote sensing and mapping of weeds in crops. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 78, n. 2, p.117-125, 2001.

LE, S., JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR: an R package for multivariate analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, n. 1, p. 1-18, 2008.

LUCHIARI JR, A.; SILVA, A. D.; BUSCHINELLI, C. C. A.; HERMES, L. C. CARVALHO, J. R. P.; SHANAHAN, J; SCHEPERS, J. S. Agricultura de precisão e meio ambiente. In: MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A.; BERNARDI, A. C. C. (eds.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema de plantio direto**. Rio de Janeiro: CNPS, 2004. p.19-35.

MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A.; BERNARDI, A. C. C.; CARMO, C. A. F. S.; VALENCIA, L. I. O.; MEIRELLES, M. S. P.; MOLIN, J. P.; PAULETTI, V.; GIMENEZ, L. M. Variabilidade de atributos de fertilidade e espacialização da recomendação de adubação e calagem para a soja. In: MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A.; BERNARDI, A. C. C. (eds.) **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema de plantio direto**. Rio de Janeiro: CNPS, 2004. p.115-129.

MACHADO, T. M.; SHIRATSUCHI, L. S.; SÁ, M. A. C.; CORAZZA, E. J. Correlação entre índice de cone e produtividade de milho utilizando ferramentas da agricultura de precisão. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 3., 2005, Sete Lagoas. **Resumos [...]**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005.

MENEGATTI, L. A. A.; MOLIN, J. P. Remoção de erros em mapas de produtividade via filtragem de dados brutos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 126-134, 2004.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, v. 22, n. 1, p. 83-92, 2002.

MULLA, D. J.; SCHEPERS, J. S. **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1997. p. 1-18.

OLIVEIRA, C. M.; VILELA, M. F.; SHIRATSUCHI, L. S.; ABDALLA, R. P.; VIEIRA, A. L. N. Amostragem em grid e imagens aéreas: métodos para estudos da distribuição espacial de corós em soja sob plantio direto no Cerrado. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 3., 2005, Sete Lagoas. **Resumos [...]**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005a.

OLIVEIRA, C. M.; SHIRATSUCHI, L. S.; VIEIRA, A. L. N.; ABDALLA, R. P. Análise da distribuição espacial de corós na cultura da soja em plantio direto no Cerrado. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 3., 2005, Sete Lagoas. **Resumos [...]**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005b.

RESENDE, A.V.; SHIRATSUCHI, L. S.; SENA, M. C.; KRAHL, L. L.; OLIVEIRA, J. V. F.; CORRÊA, R. F.; ORO, T. Grades amostrais para fins de mapeamento da fertilidade do solo em área de cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2., 2006, São Pedro. **Resumos [...]**. São Pedro: ESALQ/USP, 2006.

SALGADO, C.; CIA, E.; BALMER, E.; MONTERIO, A. R.; ABREU, C. P. Influencia da Procentagem de areia no solo e Meloidogyne incognita (Kofoid e White) Chitwood sobre a incidencia de murcha de algodoeiro causada por Fusarium oxysporum f. vasinfectun (Atk) Snyder e Hansen. In: ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ", 23., 1966, Piracicaba. **Anais [...]**. Piracicaba: ESALQ, 1966. p. 311- 323.

SANTOS, F. S. **Seleção de variáveis e definição de zonas de manejo para agricultura de precisão**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017. 55 p.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado**: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

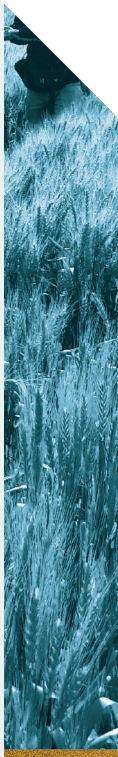
THIOULOUSE, J.; DRAY, S. Interactive Multivariate Data Analysis in R with the ade4 and ade4TkGUI Packages. **Journal of Statistical Software**, v. 22, n. 5, p. 1-14, 2007.

VERIS TECHNOLOGIES, 2011. Disponível em: http://www.veristech.com. Acesso em: 17 set. 2011.

VILELA, M. F.; FONTES, J. R. A.; SHIRATSUCHI, L. S. Mapeamento da distribuição espacial de plantas daninhas na cultura de soja por meio de sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 3., 2005, Sete Lagoas. **Resumos [...]**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005.

Variabilidade espacial de rendimento de grãos e qualidade fisiológica de semente de soja e sua relação com atributos químicos do solo

32



Spatial variability of soil chemical attributes, productivity, and physiological quality of soya beans

Antônio Luis Santi[1], Carolina Previati[2], Ezequiel Zibetti Fornari[3], Caroline Montanari Giraldi[4], Luís Felipe Rossetto Gerlach[5], Diones Thiesen Hüther[6], Bernardo Limberger Pertile[7]

[1] *Professor Doutor, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Ciências Agronômicas e Ambientais, Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul (SP), Brasil, santi_pratica@yahoo.com.br*

[2] *Acadêmico, Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul (SP), Brasil, carolinapreviati@gmail.com*

[3] *Acadêmico, Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), Brasil, ezequiel.fornari@yahoo.com.br*

[4] *Acadêmico, Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), Brasil, carolinegiraldi@hotmail.com*

[5] *Acadêmico, Curso de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), Brasil, lfelipeross@hotmail.com*

[6] *Acadêmico, Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), Brasil, diones.huther@acad.ufsm.br*

[7] *Acadêmico, Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), bernardo.pertile@acad.ufsm.br*

RESUMO

Na atividade de produção de sementes, é possível produzir sementes com alto potencial de germinação e vigor, além de uma produção de elevada qualidade fisiológica no campo. Isso permite a diferenciação e agregação de valor ao produto, garantindo sua competitividade no mercado. Estudos confirmam a existência de alta variabilidade espacial das propriedades químico-fisicas do solo, rendimento de sementes e qualidade fisiológica. Portanto, o mapeamento das qualidades fisiológicas das sementes com suas diferentes colheitas pode ser uma ferramenta valiosa para obtenção de lotes uniformes e com qualidade demandada pelo mercado. O objetivo deste estudo foi avaliar a variabilidade e distribuição espacial de rendimento de grãos e qualidade fisiológica das sementes de soja e suas possíveis relações com o ambiente e propriedades do solo. Para isso, foi realizada a coleta de sementes e de solo. Foram coletados em uma grade de amostragem regular de 100 m x 100 m, equivalente a uma grid de 1,0 hectare por amostra localizada em uma área na cidade de Seberi, RS, Brasil, ano agrícola 2014/2015. As sementes foram divididas em amostras de sementes grandes (>6,5 mm) e sementes pequenas (<5,5 mm). Posteriormente, foi analisado o potencial fisiológico dessas sementes. Nas amostras de solo, foram quantificados o teor de argila, pH, P, K, M.O., Al, Ca, Mg, CTC, SB, Cu, Zn, S e B. O peso de mil grãos e o rendimento de grãos da soja também foram avaliados. Os resultados foram submetidos à análise geoestatística e à correlação linear de Pearson. Encontrou-se alta variabilidade espacial na qualidade fisiológica das sementes. O vigor demonstrou maior sensibilidade, podendo ser usado para separação de lotes de sementes que podem ser colhidas. O tamanho da semente não afetou a qualidade fisiológico desta. Não houve correlação, nas condições estudadas, entre a rendimento de grãos e a taxa de vigor e germinação da semente. O boro é o atributo de solo que apresenta alguma correlação com a qualidade fisiológica de sementes.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merrill; agricultura de precisão; germinação; vigor.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000012

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

ABSTRACT
Within the seed production, it is possible to produce seeds with high germination potential and vigor, in addition to expecting physiological quality in the field. However, differentiation, adding value to the product and guaranteeing its position in the market, confirms the existence of high spatial variability in soil chemical properties, seed productivity and physiological quality. Therefore, mapping the physiological qualities of seeds with their different harvests can be a valuable tool to obtain more uniform batches, and with better quality. However, this study aimed to evaluate the variability and spatial distribution of soil properties, grain yield and physiological quality of soya beans and their possible relationships with the environment. To do this, the seeds and soil were collected in a regular sampling grid of 100 x 100 m, equivalent to a grid of 1.0 hectares per sample located in an area of 59 hectares in the town of Seberi, in the Rio Grande do Sul state (RS), Brazil, Agricultural Year 2014/15. The seeds are divided into samples of large seeds (>6.5mm) and small seeds (<5.5mm), after which the physiological potential of these seeds was analyzed. Soil samples were analyzed for clay content, pH, P, K, M.O, Al, Ca, Mg, CTC, SB, Cu, Zn, S and B. The thousand grain weight and the yield were also determined in the soya crop. The results were analyzed using descriptive statistical analysis, geostatistics and Pearson's linear correlation matrix. High spatial variability in seed physiological quality, and vigor has greater sensitivity and can be used for separation of seed lots that can be harvested. The size of the seed does not affect its physiological quality. Grain yield is not related to seed vigor and germination rate. Boron is the most relevant property for the physiological quality of seeds

Keywords: *Glycine max* (L.) Merrill; precision agriculture; germination; vigor.

1 INTRODUÇÃO

Um dos fatores relacionados ao aumento da produtividade de grãos da cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) está atrelado à utilização de sementes de qualidade. Sendo assim, é fundamental estudos que busquem a utilização de tecnologias nos campos de produção para melhorar os lotes de sementes produzidas. As principais características preconizadas em sementes de soja são alto potencial germinativo e vigor, sendo que essas proporcionam maior velocidade de germinação, melhor distribuição horizontal do estande, uniformidade de crescimento e maior rendimento de grãos (Santos *et al.,* 2005; Gazolla-Neto *et al.,* 2015). Não se tem na literatura consenso sobre o efeito do tamanho das sementes em relação ao seu potencial fisiológico, sendo facilmente encontrados resultados contraditórios. Autores como Scheeren et al. (2010) afirmam que sementes maiores apresentam melhores desempenhos. No entanto, outros trabalhos indicam que sementes menores se sobressaem (Costa et al., 2004), e outros que o tamanho não apresenta efeito sobre a viabilidade e vigor das sementes.

Vários estudos têm demonstrado a existência de elevada variabilidade espacial de alguns atributos do solo e do ambiente (Mondo et al., 2012; Cherubini *et al.,* 2014; 2015; Pias, 2016), assim como o rendimento de grãos das culturas (Santi et al., 2012). Sendo assim, o manejo dos campos de produção, a partir de dados médios de atributos de solo, pode refletir em manejo inadequado para boa parte do talhão.

Dessa forma, vislumbra-se a possibilidade de utilização de ferramentas de agricultura de precisão (AP) para caracterizar a distribuição espacial da qualidade fisiológica das sementes em área de produção (Mondo et al., 2012; Gazolla-Neto *et al.,* 2015), possibilitando que se realize a colheita diferenciada de subáreas da lavoura, de acordo com o potencial de cada área, obtendo-se, consequentemente, lotes mais homogêneos e de maior valor comercial (Mattioni et al., 2011).

A hipótese deste estudo é de que subáreas mais férteis e produtivas podem resultar em sementes de maior potencial fisiológico. Diante disso, objetivou-se avaliar a variabilidade espacial de rendimento de grãos e qualidade fisiológica de diferentes tamanhos de sementes de soja e sua relação com atributos do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As coletas de dados, tal como análises de sementes, foram realizadas durante o ano de 2015. As sementes analisadas pertenciam à safra de soja (2014/15), obtidas de uma área comercial da empresa Sementes Fabris Hulk, localizada do município de Seberi-RS. As coordenadas do local são: latitude 27° 34' 10'' S e longitude de 53° 22' 19'' O. Solo da área é classificado, segundo Santos *et al.* (2013), como Latossolo Vermelho distrófico típico. O relevo é constituído de suaves ondulações, com altitude aproximada de 526 m. O clima da região é subtropical úmido com verão quente, temperatura média anual em torno de 18 °C com máximas iguais ou superiores a 22 °C e precipitação pluvial média anual entre 1.900 mm e 2.200 mm (Alvares et al., 2013).

A amostragem de solo se deu após a colheita da aveia branca utilizada no inverno, no ano de 2014, realizada na profundidade de 0 m – 0,15 m, com malha amostral de 100 m x 100 m que gerou 59 pontos. Foram coletadas 12 subamostras em um raio de 10 m do ponto central para compor cada amostra composta. Na sequência, as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Análises de Solo da UFSM, campus

de Frederico Westphalen, para a quantificação de parâmetros como: pH, índice SMP, CTC, saturação por bases, fósforo, potássio, alumínio, cálcio, magnésio; enxofre; cobre; boro; manganês; zinco, argila e matéria orgânica.

A cultivar de soja utilizada foi a BMX Potência, que possui como características: grupo de maturação 6.7 – semiprecoce, tipo de crescimento indeterminado, porte alto, peso médio de mil sementes de 168 g, alto índice ramificação, resistente ao acamamento e ao Glifosato e com elevado potencial produtivo.

As coletas de sementes foram realizadas nos dias 24 e 25 de março de 2015, nos mesmos pontos amostrais em que se coletaram os solos, que, seguindo a mesma malha amostral, em um raio de 10 m do ponto central foram coletadas dez subamostras em área de 1,0 m para formarem a amostra composta.

As plantas colhidas foram trilhadas de forma separada, e as amostras em seguida foram pesadas individualmente em balança digital. Posteriormente, as sementes foram segregadas a partir do teste de retenção em peneiras. Consideraram-se sementes grandes as que se mantiveram nas peneiras >6,5 mm, e sementes pequenas <5,5 mm. Após, as sementes grandes e pequenas foram pesadas. Quantificando-se, ainda, em cada peneira, o peso de mil sementes (PMS)

Dentre as análises de qualidade fisiológica realizadas está o teste de germinação, que considera a presença ou não de estruturas essenciais nas plântulas, e sendo classificadas como plântulas normais (que mostram potencial para continuar seu desenvolvimento) e plântulas anormais (não mostram potencial para continuar seu desenvolvimento e dar origem a plântulas normais).

No procedimento utilizado para a caracterização do vigor, as sementes foram submetidas ao teste de envelhecimento acelerado, e para isso foram usadas caixas plásticas do tipo gerbox conforme germinação, inicialmente mantidas a 41 °C durante 48 horas, a fim de causar condição de estresse, conforme Panobianco e Marcos Filho (1998).

Os dados dos atributos do solo, dos componentes produtivos e da qualidade fisiológica das sementes foram submetidos à matriz de correlação linear de Pearson. Para o estudo da variabilidade espacial das variáveis, foram ajustados semivariogramas aos conjuntos de dados por meio do programa GS+ e confeccionados mapas de indicação de zonas de manejo para a realização de colheita diferenciada (ZCD) com base nos atributos de maior correlação com qualidade fisiológica.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para sementes pequenas, o peso de mil sementes (PMS) não apresentou correlação significativa com nenhum fator (Tabela 1), seja de germinação, de vigor ou de rendimento. Já para a peneira de sementes grandes, o PMS apresentou correlação significativa apenas com vigor, com valorde 0,39 classificado segundo Cohen (1988) como coeficiente médio.

Tabela 1. Correlação de Pearson entre os parâmetros produtivos, germinação e vigor de sementes de soja segregada em duas peneiras. Seberi, RS, 2015.

	Plântulas anormais	Sementes mortas	Vigor	PMS	RG
Sementes pequenas					
Plântulas normais	-0,89*	-0,93*	0,81*	0,13 ^{ns}	0,14 ^{ns}
Plântulas anormais	-	0,66*	-0,71*	-0,13 ^{ns}	-0,13 ^{ns}
Sementes mortas	-	-	-0,75*	-0,11 ^{ns}	-0,13 ^{ns}
Vigor	-	-	-	0,01 ^{ns}	0,19 ^{ns}
PMS	-	-	-	-	-0,13 ^{ns}
Sementes grandes					
Plântulas normais	-0,88*	-0,92*	0,79*	-0,21 ^{ns}	0,07 ^{ns}
Plântulas anormais	-	0,63*	-0,69*	0,15 ^{ns}	-0,09 ^{ns}
Sementes mortas	-	-	-0,74*	0,22 ^{ns}	-0,05 ^{ns}
Vigor	-	-	-	0,39*	0,09 ^{ns}
PMS	-	-	-	-	-0,13 ^{ns}

$^{(ns)}$ não significativo ou * significativo ao nível de p ≤ 0,05; PMS: peso de mil sementes; RG: rendimento de grãos.

O rendimento de grãos (RG) não apresentou correlação positiva com nenhum parâmetro, demonstrando que ambientes mais produtivos não necessariamente geram sementes com maior qualidade fisiológica, assim como observado por Mattioni et al. (2011).

É possivel observar também que o vigor apresentou elevada correlação positiva com plântulas normais em ambas peneiras, semelhante aos resultados observados por Gazolla-Neto *et al.* (2015). Além disso, o número de plântulas anormais e de sementes mortas apresentaram correlações negativas com o número de plântulas normais e vigor das sementes em ambas as peneiras de sementes.

São apresentados na Tabela 2 os coeficientes de correlação entre os atributos do solo e a qualidade fisiológica das sementes. É possível perceber a correlação negativa entre o pH e o peso de mil sementes para as sementes pequenas. Segundo a CQFS (2004), o

Tabela 2. Correlação linear de Pearson entre os atributos químicos do solo, parâmetros produtivos, germinação e vigor de sementes de soja segregada em duas peneiras, Seberi, RS, 2015.

	Plântulas		Sementes mortas	Vigor	PMS	RG
	Normais	Anormais				
Sementes pequenas						
Argila (%)	-0,02 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	0,07 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	0,14 ^{ns}	-0,34*
pH (1:1)	-0,04 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,06 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,29*	0,03 ^{ns}
P (mg dm^{-3})	0,07 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	0,05 ^{ns}
K (mg dm^{-3})	-0,04 ^{ns}	0,16 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,02 ^{ns}
MO (%)	0,10 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,02 ^{ns}
Al (cmolc dm^{-3})	-0,24 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,21 ^{ns}	-0,19 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,03 ^{ns}
Ca (cmolc dm^{-3})	0,01 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	-0,09 ^{ns}
Mg (cmolc dm^{-3})	-0,04 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,04 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	-0,03 ^{ns}
CTC (cmolc dm^{-3})	-0,01 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	-0,04 ^{ns}
SB (%)	-0,04 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,04 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	-0,09 ^{ns}
S (mg dm^{-3})	-0,04 ^{ns}	0,11 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,31*
Cu (mg dm^{-3})	-0,09 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,11 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	0,03 ^{ns}	-0,03 ^{ns}
Zn (mg dm^{-3})	0,08 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,14 ^{ns}
B (mg dm^{-3})	0,28*	-0,20 ^{ns}	-0,29*	0,28*	0,20 ^{ns}	-0,09 ^{ns}
Sementes grandes						
Argila (%)	-0,02 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	0,08 ^{ns}	-0,1 ^{ns}	0,06 ^{ns}	-
pH (1:1)	-0,06 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,09 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-
P (mg dm^{-3})	0,09 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0,2 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-
K (mg dm^{-3})	0,07 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,1 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,17 ^{ns}	-
MO (%)	0,12 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-
Al (cmolc dm^{-3})	-0,2 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,17 ^{ns}	-0,2 ^{ns}	0,11 ^{ns}	-
Ca (cmolc dm^{-3})	-0,03 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,08 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-
Mg (cmolc dm^{-3})	-0,08 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,1 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0 ^{ns}	-
CTC (cmolc dm^{-3})	-0,04 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,09 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	-
SB (%)	-0,04 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,06 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-
S (mg dm^{-3})	-0,1 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,06 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,1 ^{ns}	-
Cu (mg dm^{-3})	-0,14 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,17 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-
Zn (mg dm^{-3})	0,19 ^{ns}	-0,2 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	0,11 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	-
B (mg dm^{-3})	0,38*	-0,39*	-0,31*	0,28*	0,1 ^{ns}	-

$^{(ns)}$ não significativo ou * significativo á nível de p ≤ 0,05; PMS: peso de mil sementes; RG: rendimento de grãos.

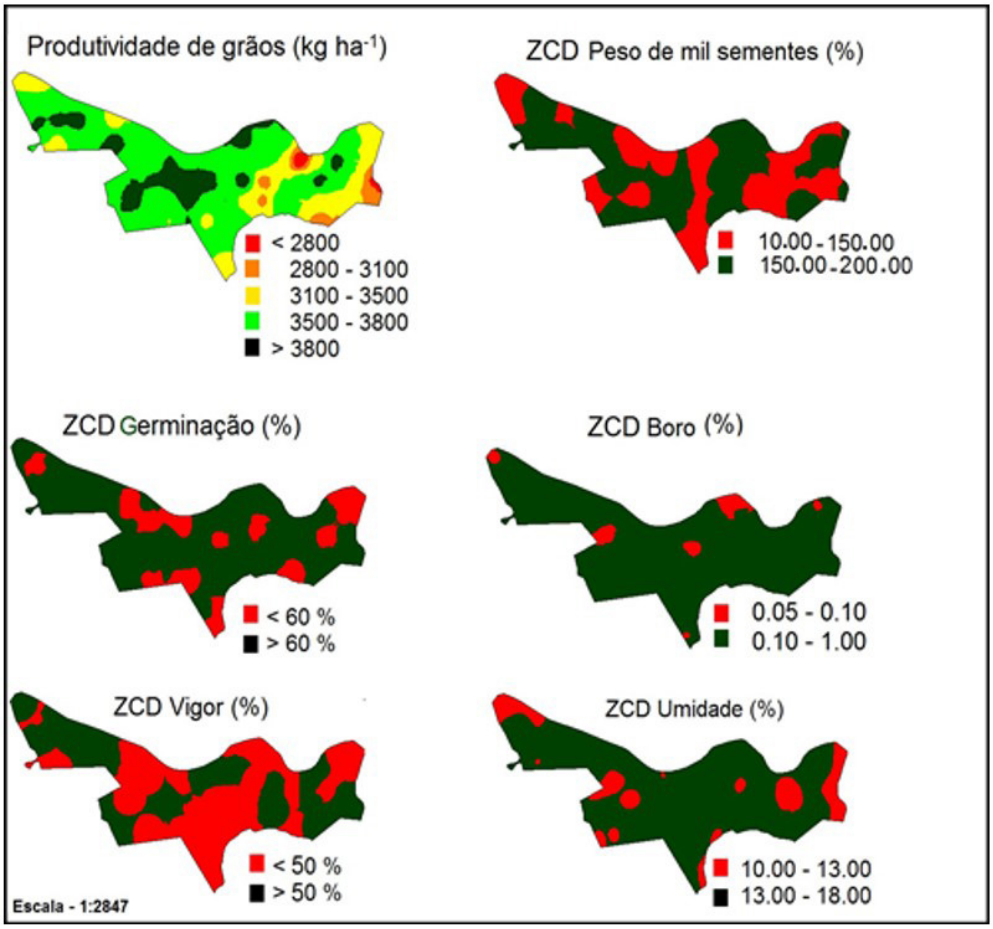


Figura 1. Mapa de isolinhas de rendimento de grãos de soja e de delimitação de duas zonas de manejo para colheita diferenciada (ZCD) em função da germinação, peso de mil sementes, vigor (envelhecimento acelerado), teor de umidade e Boro.

pH do solo muito elevado pode induzir a ocorrer deficiência de micronutrientes.

Foram observadas em trabalhos semelhantes, como os de Mondo et al. (2012) e Gazzola-Neto *et al.* (2015), baixas correlações entre os parâmetros fisiológicos da semente e os atributos químicos de solo, da mesma forma neste estudo as correlações dos atributos químicos do solo com a qualidade fisiológica das sementes não foram significativas, com exceção do Boro (B), o qual apresentou correlação com plântulas normais (0,28 e 0,38), com plântulas anormais (-0,39 em sementes grandes), com semente mortas (-0,29 e -0,31) e com vigor (0,28 e 0,28).

Por ser um micronutriente essencial para as plantas, a deficiência de B pode causar várias consequências, dentre elas o abortamento floral e má-formação das sementes (Malavolta et al., 1997), com isso, consequentemente, menor qualidade fisiológica das sementes.

Sendo o B o atributo de solo que se correlaciona com as características de qualidade fisiológica da semente de soja, é apresentada proposta de zonas de colheita diferenciada (ZCD), utilizando a variabilidade espacial de cada atributo (Figura 1). Essas ZCDs podem ser empregadas na realização de colheita antecipada, com o objetivo de evitar a exposição da semente já em maturação fisiológica a condições menos favoráveis do ambiente e consequente redução de qualidade (Terasawa et al., 2009).

Com essa metodologia, também é possível segregar lotes de acordo com o atributo objetivo, como, por exemplo, separar lotes, um com maior percentual de germinação destinado à comercialização de sementes, e outro com menor percentual de germinação destina então à comercialização como grão. Da mesma maneira pode ser realizado com o percentual de vigor, com o PMS ou até mesmo com a umidade do grão.

4 CONCLUSÕES

A qualidade das sementes, que se refere ao percentual de plântulas normais, plântulas anormais, sementes mortas e vigor, teve uma alta variabilidade espacial, com a possibilidade de ser empregada na definição de zonas de colheita diferenciada (ZCD), visando à separação de lotes mais homogêneos.

Entre os atributos de solo, apenas o Boro se correlacionou com os fatores de qualidade fisiológica de sementes, indiferentemente do tamanho da peneira utilizada.

O tamanho da semente não apresentou interferência no seu percentual de germinação, plântulas anormais e/ou sementes mortas.

Novos estudos que busquem identificar outros fatores (químicos, físicos, biológicos) que podem estar relacionados com a qualidade fisiológica de sementes são fundamentais.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa e instituições parceiras.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. *22*, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: http://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507.

CHERUBINI, M. R.*; SANTI, A. L.; EITELWEIN, M. T.; MENEGOL, D.R.; ROS, C. O.; PIAS, O. H. C.; BERGHETTI, J.* Eficiência de malhas amostrais utilizadas na caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio. **Ciência Rural**, v. *44*, n. 3, p. 425-432, 2014. DOI: http://doi.org/10.1590/S0103-84782014000300007.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Hillsdale: Erlbaum. *v. 2*, 1988.

COSTA, P. R.*; CUSTÓDIO, C. C.; MACHADO NETO, N. B.; MARUBAYASHI, O. M.* Estresse hídrico induzido por manitol em sementes de soja de diferentes tamanhos. **Revista Brasileira de Sementes**, v. *26*, n. 2, p. 105-113, 2004. DOI: http://doi.org/10.1590/S0101-31222004000200015.

GAZOLLA-NETO, A.; FERNANDES, M. C.; GOMES, A. D.; GADOTTI, G. I.; VILLELLA, F. A. Distribuição espacial da qualidade fisiológica de sementes de soja em campo de produção. **Revista Caatinga**, v. *28*, n. 3, p. 119-127, 2015. DOI: http://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n314rc.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas:** *princípios e aplicações. 2.* ed. Piracicaba: POTAFÓS, 1997. 319 p.

MATTIONI, N. M.; SCHUCH, L. O. B.; VILLELA, F. A. Variabilidade espacial da produtividade e da qualidade das sementes de soja em um campo de produção. **Revista Brasileira de Sementes**, v. *33*, n. 4, p. 608-615, 2011. DOI: http://doi.org/10.1590/S0101-31222011000400002.

MONDO, V. H. V.; GOMES JÚNIOR, F. G. G.; PINTO, T. L. F.; MARCHI, J. L.; MOTOMIYA, A. V. A.; MOLIN, J. P.; CICERO, S. M. Spatial variability of soil fertility and its relationship with seed physiological potential in a soybean production area. **Revista Brasileira de Sementes**, v. *34*, n. 2, p. 193-201, 2012. DOI: http://doi.org/10.1590/S0101-31222012000200002.

PANOBIANCO, M.; MARCOS-FILHO, J. Comparação entre métodos para avaliação da qualidade fisiológica de sementes de pimentão. **Revista Brasileira de Sementes**, v. *20*, n. 2, p. 306-310, 1998.

SANTI, A. L.; AMADO, T. J. C.; CHERUBIN, M. R.; MARTIN, T. N.; PIRES, J. L.; DELLA FLORA, L. P.; BASSO, C. J. Análise de componentes principais de atributos químicos e físicos do solo limitantes à produtividade de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. *47*, n. 9, p. 1346-1357, 2012. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900020.

SCHEEREN, B. R.*; PESKE, S. T.; SCHUCH, L. O. B.; BARROS, A. C. A.* Qualidade fisiológica e produtividade de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. *32*, n. 3, p. 35-41, 2010. DOI: http://doi.org/10.1590/S0101-31222010000300004.

TERASAWA, J. M.; PANOBIANCO, M.; POSSOMAI, E.; KOEHLER, H. S. Antecipação da colheita na qualidade fisiológica de sementes de soja. **Bragantia**, v. *68*, n. 3, p. 765-773, 2009. DOI: http://doi.org/10.1590/S0006-87052009000300025.

SANTOS, P. M.; REIS, M. S.; SEDIYAMA, T.; ARAÚJO, E. F.; CECON, P. R.; SANTOS, M. R. Efeito da classificação por tamanho da semente de soja na sua qualidade fisiológica durante o armazenamento. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 27, n. 3, p. 395-402, 2005.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

CHERUBIN, M. R.; SANTI, A. L.; EITELWEIN, M. T.; AMADO, T. J. C.; SIMON, D. H.; DAMIAN, J. M. Dimensão da malha amostral para caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 2, p. 168-177, 2015.

CHERUBINI, M. R. ; SANTI, A. L.; EITELWEIN, M. T.; MENEGOL, D. R.; ROS, C. O.; PIAS, O. H. C.; BERGHETTI, J. Eficiência de malhas amostrais utilizadas na caracterização da variabilidade espacial de fósforo e potássio. **Ciência Rural**, v. 44, n. 3, p. 425-432, 2014.

PIAS, O. H. C. **Eficiência de grades amostrais e zonas de manejo na acertividade da correção e fertilização em área de agricultura de precisão consolidada**. 2016, 85 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen.

GAZOLLA-NETO, A.; FERNANDES, M. C.; GOMES, A. D.; GADOTTI, G. I.; VILLELA, G. A. Distribuição espacial da qualidade fisiológica de sementes de soja em campo de produção. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 3, p. 119-127, 2015.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2004. 400 p.

MONDO, V. H. V.; GOMES JUNIOR, F. G.; PINTO, T. L.; MARCHI, J. L.; MOTOMIYA, A. V. A.; MOLIN, J. P.; CICERO, S. M. Spatial variability of soil fertility and its relationship with seed physiological potential in a soybean production area. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 34, n. 2, p. 193-201, 2012.

33

Variabilidade espacial de nematoides, de parâmetros do solo e da produtividade da soja e algodão no Mato Grosso

Spatial variability of nematodes, soil parameters, and soybean and cotton yields in Mato Grosso

Julio Cezar Franchini dos Santos[1], Rafael Galbieri[2], Carlos Manoel Pedro Vaz[3], Eduardo Antonio Speranza[4], Ricardo Yassushi Inamasu[5], Ladislau Marcelino Rabello[6], Henrique Debiasi[7], Pedro Oliveira Mokfa[8], Ivani de Oliveira Negrão Lopes[9], Maria Cristina Neves de Oliveira[10], Márcio de Souza[11], Amandio Pires Junior[12]

[1] *Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, julio.franchini@embrapa.br*
[2] *Pesquisador, Instituto Matogrossense do Algodão, Primavera do Leste (MT), Brasil, rafael.galbieri@imamt.org.br*
[3] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, carlos.vaz@embrapa.br*
[4] *Analista, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, eduardo.speranza@embrapa.br*
[5] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, ricardo.inamasu@embrapa.br*
[6] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, ladislau.rabello@embrapa.br*
[7] *Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, henrique.debiasi@embrapa.br*
[8] *Coordenador de Agricultura Digital, Sementes Petrovina, Pedra Preta (MT), Brasil, pedro.mokfa@petrovina.com.br*
[9] *Pesquisadora, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, ivani.negrao@embrapa.br*
[10] *Pesquisadora, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, mcristina.oliveira@embrapa.br*
[11] *Pesquisador, Instituto Matogrossense do Algodão, Cuiabá (MT), Brasil, marciosouza@imamt.org.br*
[12] *Coordenador Técnico, Instituto Matogrossense do Algodão, Cuiabá (MT), Brasil, amandopires@imamt.org.br*

RESUMO

Os nematoides representam um importante desafio para a produção de soja, milho e algodão na região Central do Brasil, devido à ocorrência generalizada, à baixa disponibilidade de cultivares resistentes e à necessidade da aplicação de estratégias integradas para o seu manejo. O objetivo deste trabalho foi estudar as relações entre a distribuição espacial de espécies de nematoides, parâmetros do solo e a produtividade das culturas da soja e algodão usando ferramentas da agricultura de precisão. O estudo foi realizado em um talhão de produção comercial de soja, milho e algodão, de 101 ha, localizado na Fazenda Farroupilha, no município de Pedra Preta, na região sudeste do Mato Grosso. Os resultados permitiram estabelecer a distribuição espacial de três espécies de nematoides com potencial para interferir na produtividade das culturas estudadas. A densidade populacional de *Heterodera glycines* nas raízes da soja apresentou correlação negativa com a densidade populacional de *Rotylenchulus reniformis* e *Pratylenchus brachyurus*, indicando uma distribuição espacialmente relacionada entre as espécies. A produtividade da soja e do algodão foram bem relacionadas entre si, inversamente relacionadas à densidade populacional de *R. reniformis* no solo e diretamente relacionadas com parâmetros de fertilidade do solo. De acordo com o comprimento vetorial observado na análise de componentes principais foi possível estabelecer a seguinte ordem de relevância decrescente: P > Zn > V > Ca > Mn > K > CTC > Mg. A análise de agrupamento dividiu o talhão em três zonas com características distintas. A zona 1 foi caracterizada por apresentar densidade populacional de *H. glycines* acima da média do talhão, baixas correlações da produtividade com variáveis de solo e a produtividade da soja e do algodão, representando a média do talhão. A zona 2 foi caracterizada pelo predomínio de *R. reniformis* e sua correlação negativa com a produtividade da soja e do algodão, altas correlações da produtividade com as variáveis de solo e produtividades da soja e do algodão abaixo da média do talhão. A zona 3 apresentou níveis populacionais intermediários das três espécies de nematoides, sendo a região mais fértil e produtiva do talhão. Embora a densidade populacional das espécies de nematoides no solo e nas raízes tenha tido maior contribuição na definição das zonas de manejo, a fertilidade do solo exerceu papel fundamental na resposta produtiva da soja e do algodão ao parasitismo dos nematoides. A região mais fértil do talhão, mesmo com a ocorrência das três espécies de nematoides, foi a mais produtiva do talhão. O uso de uma cultivar com resistência a *R. reniformis* e a

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000016

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

aplicação a taxa variável de calcário, P, K, Zn e Mn são estratégias importantes para maximizar a produtividade da soja e do algodão neste talhão, proporcionando às culturas maior capacidade de conviver com a alta densidade populacional de *R. reniformis*. A análise da densidade populacional de nematoides, dos parâmetros de solo e da produtividade da soja e do algodão permitiu definir zonas de manejo com estratégias sitio-especificas baseadas no uso de cultivares com resistência a *R. reniformis* e aplicação à taxa variável de calcário e fertilizantes.

Palavras-chave: fertilidade do solo; fitonematoides; análise multivariada; zonas de manejo.

ABSTRACT

Nematodes represent an important challenge for soybean, corn, and cotton production in the Central region of Brazil due to their widespread occurrence, the low availability of resistant cultivars, and the need to apply integrated management strategies. The objective of this work was to study the relationships between the spatial distribution of nematode species, soil parameters, and soybean and cotton yields using precision agriculture tools. The study was carried out in a soybean, corn, and cotton field, of 101 ha, placed at Fazenda Farroupilha, in Pedra Preta city, in Mato Grosso's southeastern region. The results showed that the spatial distribution of three nematode species had the potential to interfere with the productivity of the cultivated crops. The Heterodera glycines population density in soybean roots showed a negative correlation with Rotylenchulus reniformis and Pratylenchus brachyurus population density, indicating a spatially related distribution between the species. Soybean and cotton yields positively correlated, but inversely correlated with the population density of R. reniformis in the soil and directly related to soil fertility parameters. According to the vector length observed in the principal components analysis, it was possible to establish the following decreasing order of relevance: P > Zn > V > Ca > Mn > K > CTC > Mg. The cluster analysis divided the field into three zones with distinct characteristics. Zone 1 was characterized by showing a population density of H. glycines well above the average of the field, low correlations of yield with soil variables, and soybean and cotton yield representing the average of the field. Zone 2 was characterized by the predominance of R. reniformis and its negative correlation with soybean and cotton yield, high correlations of yield with soil variables, and soybean and cotton yields below the stand average. Zone 3 showed intermediate population levels of the three nematode species, being the most fertile and productive region of the field. Although the population density of nematode species in the soil and roots contributed to the definition of management zones, soil fertility played a fundamental role in the productive response of soybean and cotton to nematode parasitism. Hence, the field's most fertile region, even with the occurrence of the three species of nematodes, was the most productive. The use of a resistant cultivar to R. reniformis and the application at a variable rate of lime, P, K, Zn, and Mn are important strategies to maximize soybean and cotton yield in this field, providing the cultures with greater capacity to live with the high population density of R. reniformis. The analysis of nematode population density, soil parameters, and soybean and cotton yield allowed the defining of management zones with site-specific strategies based on the use of resistant cultivars to R. reniformis and application at a variable rate of limestone and fertilizers.

Keywords: soil fertility; phytonematodes; multivariate analysis; management zones.

1 INTRODUÇÃO

Fitonematoides têm potencial para causar danos elevados e proporcionar perdas econômicas importantes nas culturas da soja, do milho e do algodão no Mato Grosso e Bahia, onde se concentram as principais regiões produtoras. Os nematoides que causam os maiores danos econômicos a essas culturas são as espécies *Meloidogyne incognita, Rotylenchulus reniformis, Pratylenchus brachyurus* e *Heterodera glycines*, variando sua importância em função da cultura. Galbieri et al. (2014), em levantamento nematológico realizado no Mato Grosso nas safras 2011/2012 e 2012/2013, em 1.162 amostras de solo e raízes de algodão, observaram maior ocorrência de *P. brachyurus* (96%), seguido de *M. incognita* (23%) e de *R. reniformis* (10%). Além dos nematoides que atacam a cultura do algodoeiro, os autores também observaram, em 15% das amostras, a ocorrência de *H. glycines*, nematoide exclusivo da cultura da soja. Perina et al. (2017), em levantamento nematológico realizado no oeste da Bahia, na safra 2016/2017, em 400 amostras de solo e raízes de algodão, também identificaram as mesmas espécies observadas por Galbieri et al. (2014) no Mato Grosso. Mais uma vez, *P. brachyurus* (70%) foi a espécie que apresentou maior ocorrência, seguido por um aumento relativo de importância de *M. incognita* (47%) e de *R. reniformis* (15%).

Apesar da ocorrência generalizada e do potencial de dano desses nematoides às principais culturas, demonstrados nestes levantamentos, ainda existe uma carência muito grande de informações sobre a interação entre fatores ambientais e a tolerância das espécies vegetais às diferentes espécies de nematoides, o que dificulta o estabelecimento de estratégias de prevenção e manejo. Essa abordagem é de extrema importância, uma vez que a intensidade dos da-

nos ocasionados por nematoides depende da interação entre o hospedeiro, o patógeno e o ambiente. Fatores ambientais podem alterar a intensidade dos sintomas, por influenciarem tanto a predisposição das plantas à doença, quanto a sobrevivência, disseminação, infecção, colonização e reprodução do patógeno. Resultados obtidos com *P. brachyurus* indicam que o manejo correto da acidez do solo é importante estratégia para redução dos danos em soja, uma vez que aumenta a tolerância das plantas ao ataque dos nematoides (Debiasi et al., 2011; Franchini et al., 2011; Mendes et al., 2012; Franchini et al., 2014, 2018) e reduz sua densidade populacional (Trevathan et al., 1985; Sarah et al., 1991; Melakeberhan et al., 1997; Kandji et al., 2001). Por outro lado, *H. glycines* tem tido o aumento de sua ocorrência e do potencial de dano à soja, associado à elevação do pH do solo, por aplicação excessiva de calcário (Garcia et al., 1999; Smith et al., 2001; Avendaño et al., 2004; Melakeberhan; Avendaño, 2008; Pinheiro et al., 2008). No entanto, essas relações ainda são pouco conhecidas para a ocorrência simultânea de várias espécies de nematoides com potencial de dano numa mesma área.

Neste contexto, este trabalho teve como objetivos determinar a densidade populacional de nematoides em um talhão comercial de produção de soja, milho e algodão na região sudeste do Mato Grosso e estabelecer relações de causa e efeito com variáveis da fertilidade do solo e a produtividade da soja e do algodão utilizando ferramentas da agricultura de precisão, visando definir zonas de manejo com estratégias sitio-especificas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em um talhão de produção comercial localizado na fazenda Farroupilha, no município de Pedra Preta, na região Sudeste do Mato Grosso (latitude 16º 52' 53,64'' e longitude 54º 04' 20,10''). O talhão tem uma área total de 101 ha e foi originalmente ocupado pela vegetação natural típica da região do cerrado. A área vem sendo utilizada, nos últimos dez anos, para a produção das culturas de soja, milho e algodão, sob sistema de rotação que alterna a cultura da soja e do milho segunda safra, em um ano, com a cultura do algodão segunda safra, no ano seguinte. O solo no local foi caracterizado como Latossolo Vermelho distroférrico típico, textura muito argilosa. A precipitação pluvial anual média é de 1.500 mm. As culturas têm recebido aplicação de fertilizantes para obtenção de altas produtividades, com doses médias de 220, 100 e 230 kg ha^{-1} de KCl e 150, 122 e 210 kg ha^{-1} de MAP, para a soja, milho e algodão respectivamente. O milho recebe uma dose equivalente a 100 kg de N ha^{-1} na forma de ureia, sendo 40 kg ha^{-1} na semeadura e 60 kg ha^{-1} em cobertura no estádio V4, e mais uma dose de 40 kg ha^{-1} de S na forma de enxofre de bentonita, na semeadura. No algodão, a adubação nitrogenada envolve a aplicação de 45 kg ha^{-1} de N na forma de ureia na semeadura, mais o equivalente a 60 kg ha^{-1} de N na forma de sulfato de amônio em cobertura no estádio F1. A adubação em cobertura com sulfato de amônio no algodão ainda agrega uma dose equivalente de 66 kg ha^{-1} de S. A última calagem foi realizada em 01/10/2018, antes da semeadura da soja. O calcário foi aplicado em superfície utilizando taxa variável, com o valor médio aplicado equivalendo a 2,4 Mg ha^{-1}. Neste trabalho foram avaliadas a cultura da soja na safra 2018/2019 e a cultura do algodão na safra 2019/2020. A cultivar de soja BMX Desafio RR 8473RSF foi semeada em 14/10/2018 no espaçamento de 50 cm entre linhas e população de 440 mil plantas ha^{-1}. O talhão recebeu o manejo adotado pela fazenda, seguindo recomendações técnicas indicadas para a cultura da soja. A cultivar de algodão FM 944 GL foi semeada em 22/01/2020 no espaçamento de 70 cm entre linhas e população de 110 mil plantas ha^{-1}. O talhão recebeu o manejo adotado pela fazenda, seguindo recomendações técnicas indicadas para a cultura do algodão.

A condutividade elétrica aparente do solo (CE) foi determinada em 15/02/2018, após a colheita do algodão ou milho segunda safra, nas profundidades de 0,0-0,3 m (CE30) e 0,0-0,9 m (CE90), por meio do sensor de contato direto Veris 3100® e respectivo sistema de aquisição de dados. A avaliação da CEa (expressa em mS m^{-1}) foi realizada em faixas distanciadas de 10 m entre si, com largura de 2,35 m, correspondente à largura do equipamento.

Em 18/01/2019, quando a cultivar de soja se encontrava no estádio fenológico R5.5 (75 a 100% do enchimento dos grãos), foram coletadas 70 amostras de solo na camada de 0,0-0,2 m, para determinação de atributos químicos [pH em $CaCl_2$, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), acidez potencial, alumínio (Al^{3+}), capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V)], segundo a metodologia descrita por Raij et al. (2001), e a granulometria do solo com um analisador granulométrico automático de raios gama (Naime et al., 2001). As amostras de solo foram coletadas por meio de trado do tipo holandês, em pontos regularmente distribuídos na área, seguindo uma grade amostral de 100 x 150 m. Ao redor de cada ponto, foram coletadas cinco subamostras para formar uma amostra compos-

ta. A população de nematoides foi avaliada no solo e nas raízes da soja e do algodão. Para a análise de nematoides no algodão, foram coletadas amostras em 18/05/2020, seguindo uma grade amostral de 200 x 150 m, quando a cultura estava no estádio C1 (rompimento do primeiro botão em capulho, localizado no primeiro ramo). A quantificação de nematoides no solo foi realizada em amostras com volume de 200 cm^3, utilizando a metodologia descrita por Jenkins (1964). Adicionalmente, foram coletadas amostras de raízes de dez plantas ao redor dos pontos utilizados para coleta de amostras de solo. A quantificação dos nematoides foi realizada em amostras contendo 5 g de raízes, utilizando a metodologia de Coolen e D'Herde (1972). No dia 04/02/2019, foi realizada a colheita da soja com uma colhedora autopropelida de grãos modelo Case Extreme 8230, equipada com plataforma de 12,2 m, sensores de fluxo e de umidade e sistema de posicionamento global. Os 47 mil pontos de medida obtidos na colheita, com coeficiente de variação (CV) de 23%, foram filtrados para eliminar dados discrepantes e inconsistentes. Para esse procedimento, foi utilizado o software MapFilter (Spekken et al., 2013), considerando os limiares de 40% de variação geral, 18 m de dependência espacial e 5% de variação local. Após a filtragem, restaram 19 mil pontos (CV de 6%), o que significou uma grade amostral aproximada de 12,2 x 4 m. Os dados foram convertidos para a unidade de Mg ha^{-1} a 13% de umidade. No dia 26/08/2020, foi realizada a colheita do algodão com uma colhedora autopropelida modelo John Deere CP690, equipada com plataforma de 2,44 m, unidades de colheita tipo fuso em linha e sistema de posicionamento global. Os 114 mil pontos de medida obtidos na colheita, com coeficiente de variação (CV) de 26%, foram filtrados para eliminar dados discrepantes e inconsistentes. Para esse procedimento, foi utilizado o software MapFilter (Spekken et al., 2013), considerando os limiares de 40% de variação geral, 10 m de dependência espacial e 5% de variação local. Após a filtragem, restaram 82 mil pontos (CV de 15%) a serem utilizados, o que significou uma grade amostral aproximada de 2,44 x 3,6 m. O milho segunda safra foi cultivado entre a soja e o algodão, porém não foi gerado mapa de colheita para a cultura. Para a cultura do algodão foram obtidos mapas com composições dos índices de vegetação NDVI (B8-B4/B8+B4) e NDWI (B8-B12)/(B8+B12) a partir de imagens sem incidência de nuvens do satélite Sentinel-2, nos meses de março (0320), abril (0420) e maio (0520), considerando o valor máximo de cada pixel em cada período.

Os dados de parâmetros de solo (CEa, textura e fertilidade do solo), da densidade populacional de nematoides e da produtividade da soja e do algodão foram submetidos à análise de normalidade pelo teste de K^2 e posteriormente modelados por meio de krigagem, utilizando o programa VESPER (Variogram Estimation and Spatial Prediction plus ERror) (Minasny et al., 2005). Em sua maioria, os dados originais dos parâmetros de solo e da produtividade das culturas apresentaram distribuição normal. Por outro lado, os dados originais da densidade populacional de nematoides apresentaram normalidade apenas para *P. brachuyrus* no solo (Psolo) e na raiz (Praiz) e *R. reniformis* no solo (Rsolo), o que está de acordo com a ocorrência uniformemente espacializada dessas espécies no talhão. As variáveis *R. reniformis* na raiz (Rraiz) e *H. glycines* no solo (Gsolo) e na raiz (Graiz), por apresentarem valores nulos em vários pontos na área experimental, foram transformadas usando o logaritmo natural de x+1. Após as transformações para a estabilização da variância, os testes de normalidade foram recalculados e os dados passaram a apresentar distribuição normal (dados não apresentados).

Para seleção dos melhores modelos ajustados aos semivariogramas experimentais, foi utilizado o coeficiente de correlação entre os valores krigados e medidos, obtido por meio da validação cruzada (índice AIC). Os valores krigados das variáveis avaliadas foram utilizados para criar mapas utilizando o programa QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2022). Os dados krigados também foram submetidos à análise de componentes principais (ACP) e de agrupamento hierárquico com base no algoritmo de dados Flexible beta (Lance; Williams, 1967), seguindo protocolos desenvolvidos no programa SAS (SAS INSTITUTE, 2001). A análise de agrupamento hierárquico permitiu identificar as regiões dentro do talhão que compartilham características semelhantes com relação aos atributos avaliados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi observada variabilidade espacial para os parâmetros CE30, CE90, CTC e o teor de argila (Figura 1), que são considerados características permanentes e, portanto, não podem ser modificadas no curto prazo por práticas de manejo baseadas na aplicação de insumos a taxa variável. A classe textural do talhão foi classificada como muito argilosa, sendo o teor de argila mínimo de 52% e o máximo de 60% (Figura 1). A CE30 e CE90, tenderam a aumentar do vértice inferior esquerdo para o vértice superior direito do talhão, de forma diagonal. Apesar das pequenas variações, o teor de argila foi inversamente relacionado com a variação da CTC.

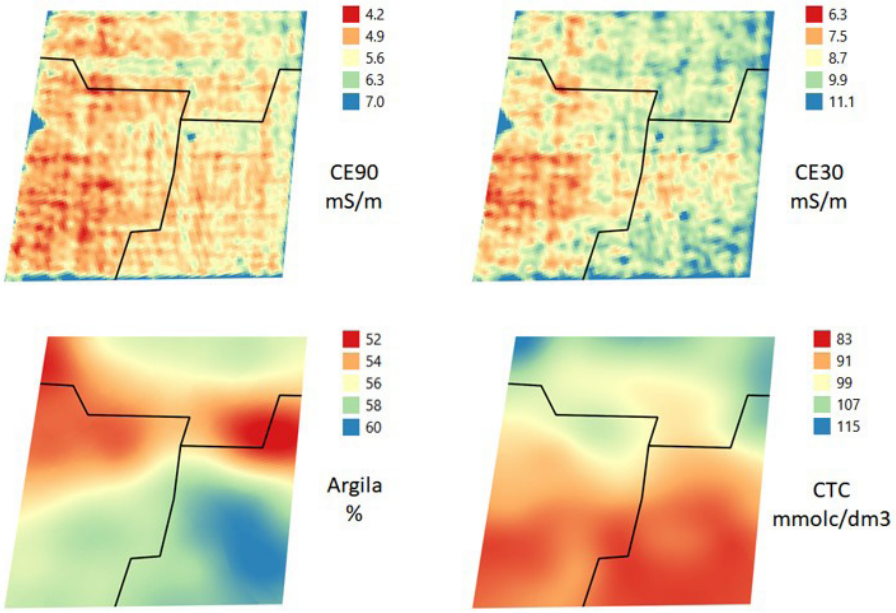


Figura 1. Variabilidade espacial da condutividade elétrica nas camadas de 0-30 cm (CE30) e 0-90 cm (CE90), do teor de argila e da CTC no talhão de produção de soja, milho e algodão. As linhas pretas delimitam as zonas de manejo definidas na Figura 7.

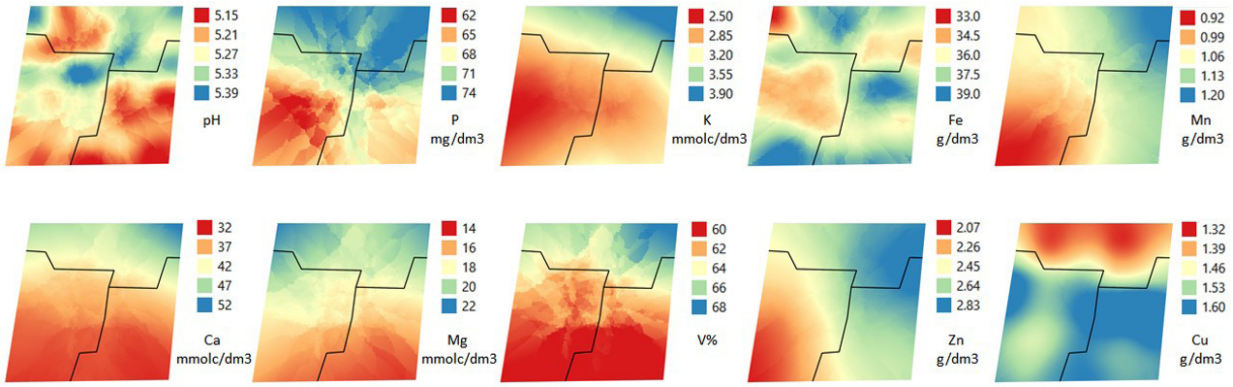


Figura 2. Variabilidade espacial de parâmetros de fertilidade do solo no talhão de produção de soja, milho e algodão. As linhas pretas delimitam as zonas de manejo definidas na Figura 7.

Tabela 1. Estatística descritiva para variáveis da fertilidade do solo no talhão de estudo.

Variável	Unidade	n	Média	Desvio padrão	Mínimo**		Máximo**	
pH		70	5.25	0.22	4.85	M	5.98	A
P	mg dm^{-3}	70	70.64	13.54	45.38	A	100.78	MA
K	$mmol_c$ dm^{-3}	70	3.07	0.63	2.08	M	4.79	A
Ca	$mmol_c$ dm^{-3}	70	39.45	8.57	26.88	A	67.58	A
Mg	$mmol_c$ dm^{-3}	70	18.53	4.99	9.86	A	39.78	A
V	%	70	63.32	7.55	50.81	B	84.33	A
Cu	mg dm^{-3}	70	1.52	0.16	1.20	A	1.94	A
Fe	mg dm^{-3}	70	36.77	4.82	23.40	A	45.24	A
Mn	mg dm^{-3}	70	1.08	0.16	0.77	B	1.62	M
Zn	mg dm^{-3}	70	2.55	0.29	1.89	A	3.18	A

**Classes de interpretação segundo Raij et al. (2001) - B: Baixo; M: Médio; A: Alto; MA: Muito Alto.

Também foi observada variabilidade espacial para os parâmetros químicos avaliados (Figura 2). Usando os critérios estabelecidos por Raij et al. (2001) (Tabela1), a maioria das variáveis de fertilidade do solo, apesar da variabilidade espacial, encontra-se em níveis considerados altos, como é o caso para P, Ca, Mg e Zn. Já a saturação por bases (V) e o pH em $CaCl_2$ estão em nível médio, o K está variando entre o nível médio e alto e o Mn se encontra na maior parte da área, no nível considerado baixo (< 1,2 mg dm^{-3}). De acordo com a interpretação acima, há oportunidades para correções espacialmente variadas da saturação por bases, do K, e do Mn. Nota-se que foi estabelecido um padrão na distribuição espacial da maioria das variáveis de fertilidade do solo no mesmo sentido observado para as variações da CE30 e CE90 (Figuras 1 e 2). Esse padrão foi mais bem caracterizado pelas variáveis P, K, Ca, Zn e Mn.

Foram identificadas três espécies de nematoides com potencial para causar perdas de produtividade às culturas cultivadas no talhão. O nematoide *P. brachyurus* foi predominante nas raízes enquanto *H. glycines* e *R. reniformis* predominaram no solo, o que está de acordo com as características biológicas destes nematoides e as épocas de amostragem. A não-normalidade da distribuição dos dados das populações de *R. reniformis* e *H. glycines* pode ser um indicativo da preferência especifica por diferentes ambientes dentro do talhão.

Foi observada uma distribuição espacial diferenciada para as espécies de nematoides, com *H. glycines* sendo predominante no lado direito do talhão, enquanto *R. reniformis* e *P. brachyurus* predominaram no lado esquerdo do talhão (Figura 3), sendo estes nematoides os mais importantes para a cultura da soja. Para *H. glycines*, isso também pode estar relacionado com o ponto de entrada dessa espécie no talhão, por se tratar de uma espécie introduzida na área. Quando considerada a cultura do algodão, esse padrão foi mantido apenas para *R. reniformis*, *sendo* observado um aumento no valor médio desse nematoide no solo em relação ao observado na avaliação realizada durante o ciclo da soja, de 1.177 para 1.707 indivíduos 200 cm^{-3} de solo.

A ocorrência dessas espécies de nematoides está intimamente relacionadas com as culturas cultivadas no talhão. Conforme Dias et al. (2010), *R. reniformis* é uma espécie importante para o algodão, mas também pode causar danos à soja; *H. glycines* é uma espécie específica da soja, enquanto *P. brachyurus* é uma espécie polífaga atacando o algodão, o milho e a soja, cultura em que apresenta maior potencial de causar perdas de produtividade. Adicionalmente, o milho é hospedeiro favorável de *P. brachyurus*, embora perdas diretas de produtividade sejam pouco comuns; por outro lado, esse cereal não é hospedeiro de *R. reniformis* e *H. glycines* (Dias et al., 2010). Na amostragem realizada na cultura do algodão, a população de *H. glycines* foi reduzida a ponto de não ser detectada nesta avaliação. Por outro lado, houve um aumento relativo de 45% na densidade populacional de *R. reniformis* na cultura do algodão em relação à amostra-

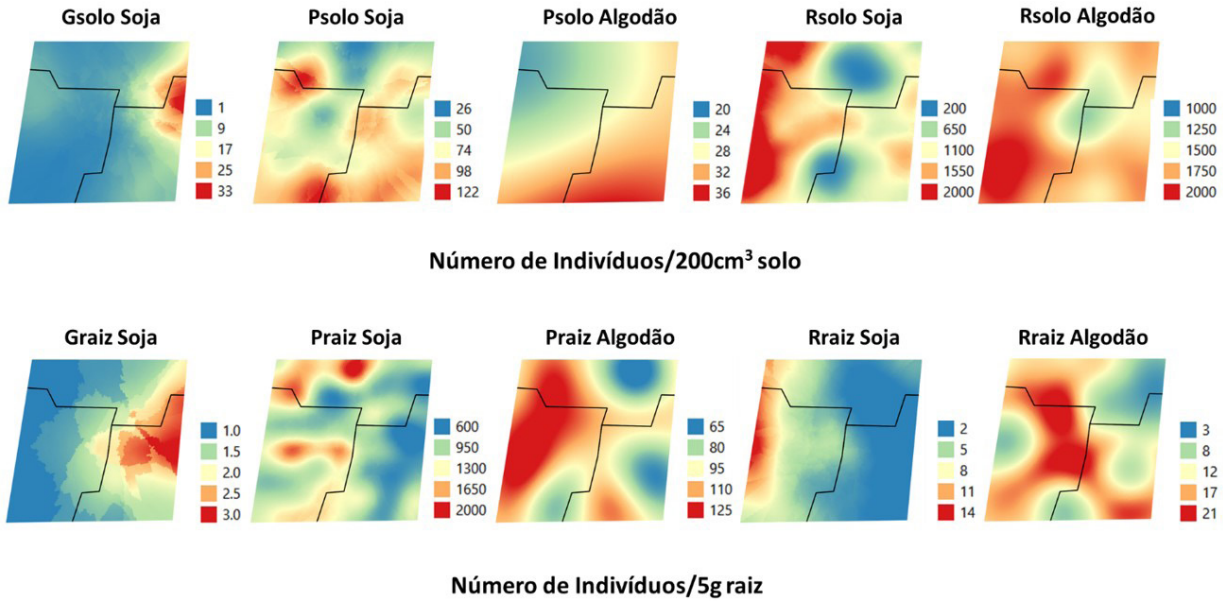


Figura 3. Variabilidade espacial da densidade populacional no solo e na raiz de *Heterodera glycines* (Gsolo; Graiz), *Pratylenchus brachyurus* (Psolo; Praiz) e *Rotylenchulus reniformis* (Rsolo; Rraiz) na cultura da soja na safra 2018/2019 (soja) e na cultura do algodão na safra 2020 (algodão). As linhas pretas delimitam as zonas de manejo definidas na Figura 7.

gem realizada na cultura da soja. Essas observações estão de acordo com as especificidades de *H. glycines* e *R. reniformis* com a cultura da soja e do algodão respectivamente, afetando a taxa de reprodução dos nematoides nas diferentes culturas.

A análise de componentes principais (Figura 4) indica que, em certo grau, o padrão de distribuição espacial das espécies de nematoides acompanhou a fertilidade do talhão, sendo *R. reniformis* e *P. brachyurus* predominantes na região menos fértil, enquanto *H. glycines* predominou na região mais fértil, principalmente se considerados os micronutrientes Zn e Mn (Figuras 2 e 3). Vale ressaltar que o papel desses micronutrientes na dinâmica populacional dos nematoides avaliados neste estudo precisa ser mais bem avaliado e entendido em estudos no futuro. É importante observar que *H. glycines* não foi detectado nas avaliações realizadas no solo e nas raízes da cultura do algodão, reforçando que a rotação de culturas com espécie não hospedeira foi uma estratégia importante para redução da população desse nematoide no talhão. Para *P. brachyurus,* a densidade populacional nas raízes do algodão foi inversamente relacionada à população no solo. Esse comportamento pode estar relacionado com o nível de dano causado à cultura e com o hábito migrador de *P. brachyurus*, já que plantas com alta densidade populacional nas raízes podem entrar em senescência antecipadamente, de modo que nematoides migram das raízes para o solo (Goulart, 2008). Assim, plantas atacadas mais precocemente, no final do ciclo tenderiam a apresentar menor densidade populacional na raiz em relação ao solo e vice-versa. Para as outras duas espécies, foi observada uma relação direta entre a densidade populacional no solo e nas raízes.

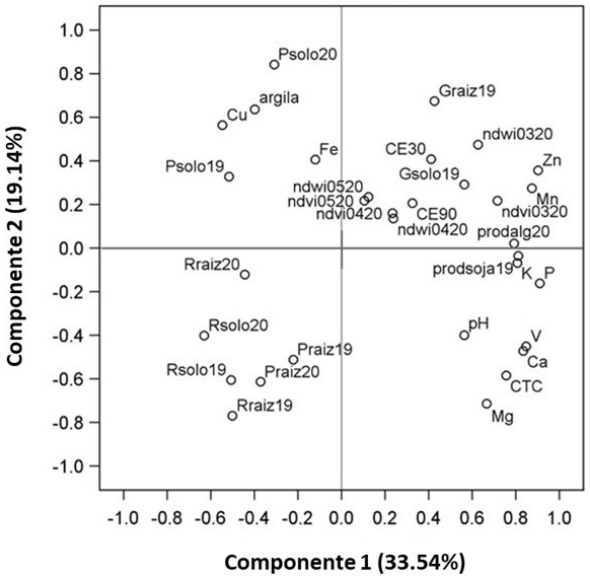


Figura 4. Análise de componentes principais da densidade populacional no solo e na raiz de *Pratylenchus. brachyurus* (Psolo e Praiz), *Heterodera glycines* (Gsolo e Graiz), *Rotylenchulus reniformis* (Rsolo e Rraiz), de parâmetros de solo (argila, CE30, CE90, CTC, pH, P, K, Ca, Mg, V, Cu, Fe, Zn e Mn), índices vegetativos na cultura do algodão (NDVI e NDWI, em março (0320), abril (0420) e maio (0520)) e da produtividade da soja (prodsoja19) e do algodão (prodalg20) na Fazenda Farroupilha. Para a densidade populacional de nematoides, o índice 19 indica amostragem na cultura da soja na safra 2018/2019 e o índice 20 indica a amostragem na cultura do algodão na safra 2020.

A influência da densidade populacional de *H. glycines* sobre a produtividade da soja não ficou claramente evidenciada, provavelmente porque os valores ainda podem ser considerados baixos, embora, como será discutido mais adiante, essa não foi a zona mais produtiva do talhão, indicando que pode haver alguma influência desse nematoide na produtividade da soja. Como já observado por Franchini et al. (2018), a densidade populacional de *P. brachyurus* no solo, foi inversamente relacionada ao pH e a V, evidenciando a preferência dessa espécie por ambientes mais ácidos dentro do talhão.

Os índices vegetativos NDVI e NDWI apresentaram variabilidade espacial principalmente no mês de março, quando a cultura do algodão se encontrava no estádio de botões florais (B5), sendo menor para os meses de abril e maio com o desenvolvimento da cultura avançando para os estádios de florescimento e abertura de capulho (Figura 5). A análise de componentes principais indica que os índices vegetativos NDVI0320 e NDWI0320 foram inversamente relacionados com a densidade populacional de *P. brachyurus e R. reniformis* no solo e nas raízes e diretamente relacionados com a fertilidade do solo, principalmente os teores de Zn, Mn, K e P (Figura 4). Esse comportamento indica que o vigor da cultura do algodão durante o mês de março estaria sendo influenciado pela variabilidade espacial da fertilidade do solo e da densidade populacional desses nematoides.

A produtividade da soja e do algodão é apresentada na Figura 6. A análise de componentes principais (Figura 4) indicou que a produtividade da soja e a do algodão foram positivamente relacionadas com boa parte das variáveis de fertilidade do solo e negativamente relacionadas com a densidade populacional de *P. brachyurus* e *R. reniformis* no solo e nas raízes, mesmo comportamento observado para os índices vegetativos obtidos no mês de março. Entre as variáveis de fertilidade mais importantes, com base no comprimento vetorial, foi possível estabelecer a seguinte ordem de relevância: P > Zn > Ca > V > K > Mn > Mg. Os resultados indicam que apesar de os níveis de P, Ca e Zn serem considerados altos, pelos critérios estabelecidos por Raij et al. (2001), ainda haveria po-

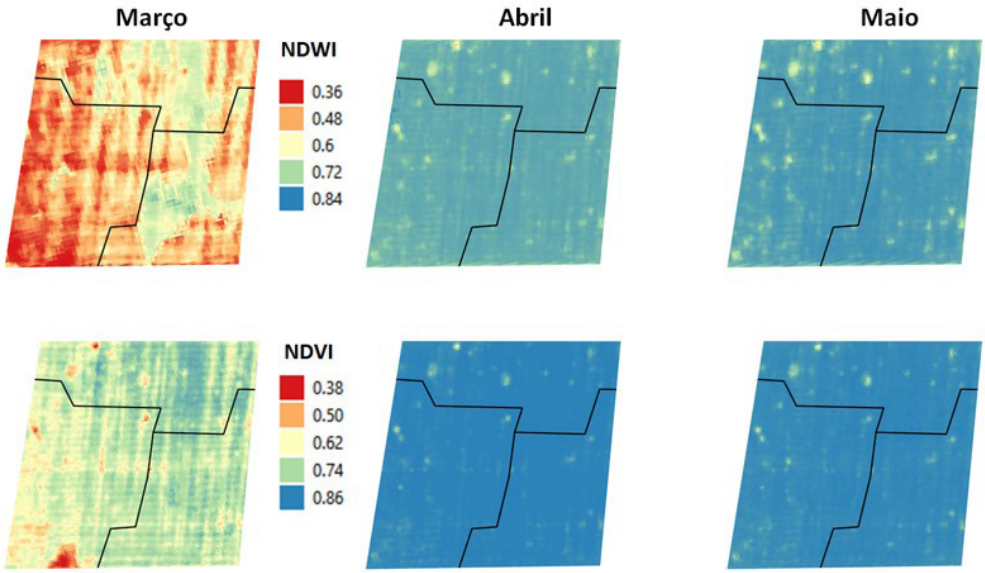


Figura 5. Variabilidade espacial dos índices vegetativos NDVI e NDWI, nos meses de março, abril e maio, da cultura do algodão na safra 2020. As linhas pretas delimitam as zonas de manejo definidas na Figura 7.

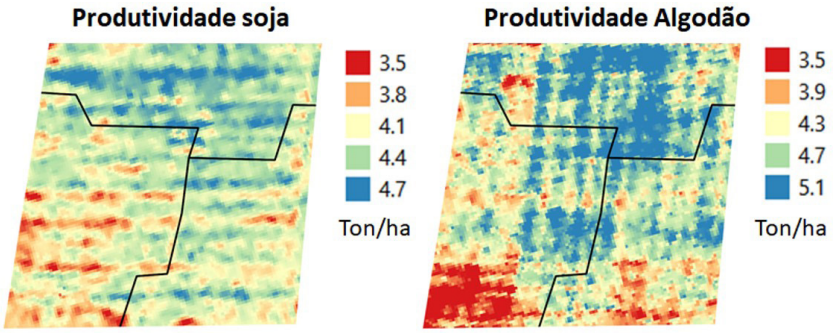


Figura 6. Mapa da variabilidade espacial da produtividade da cultura da soja (2018/2019) e algodão (2020) na Fazenda Farroupilha, Sementes Petrovina, Pedra Preta/MT, 2019. As linhas pretas delimitam as zonas de manejo definidas na Figura 7.

tencial de resposta à correção espacializada desses nutrientes no talhão, por meio do uso de aplicações em taxa variável.

A análise de agrupamento dividiu o talhão em três zonas com características distintas (Figura 7 e Tabela 2). Alguns valores médios de variáveis importantes para a definição das zonas de manejo são apresentados na Tabela 2. A zona 1 foi caracterizada por apresentar densidade populacional de *H. glycines* acima da média do talhão, baixas correlações da produtividade com variáveis de solo e a produtividade da soja e do algodão representando a média do talhão. A zona 2 foi caracterizada pelo predomínio de *R. reniformis* e correlação negativa da produtividade com a população desse nematoide no solo, correlações positivas da produtividade com os parâmetros de fertilidade do solo e produtividade da soja e do algodão abaixo da média do talhão. A zona 3 apresentou níveis populacionais intermediários das três espécies de nematoides, sendo a região mais fértil e produtiva do talhão.

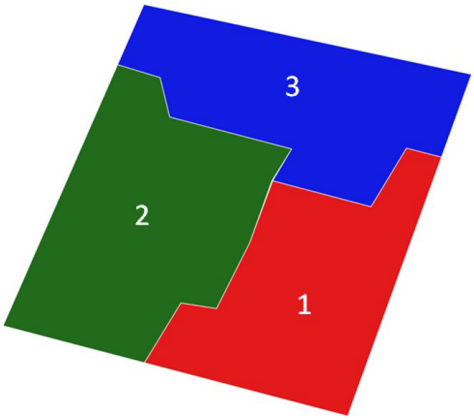


Figura 7. Zonas de manejo definidas com base na análise de agrupamento. Fazenda Farroupilha, Sementes Petrovina, Pedra Preta/MT.

Embora a densidade populacional das espécies de nematoides no solo e nas raízes tenha tido maior participação na definição das zonas de manejo, a fertilidade do solo exerceu papel importante no desem-

Tabela 2. Valores médios de algumas variáveis importantes para a definição das zonas de manejo no talhão de estudo.

	Gsolo	Rsolo	Rsolo	NDVI	NDWI	K	Ca	Mg	Zn	CTC	prodalg	prodsoja
	19	19	20	0320	0320						20	19
Zona 1	9.67	957.41	1613.40	0.70	0.55	3.01	35.67	16.19	2.63	89.50	4.46	4.22
Zona 2	2.68	1516.43	1824.61	0.66	0.47	2.74	36.21	17.45	2.34	92.51	4.35	4.12
Zona 3	7.57	965.42	1654.10	0.72	0.55	3.49	44.81	19.89	2.69	103.17	4.78	4.40

Gsolo19: número de indivíduos (*Heterodera glycines*) por 200 cm^3 de solo quantificado na safra 2018/19; Rsolo19: número de indivíduos (*Rotylenchulus reniformis*) por 200 cm^3 de solo quantificado na safra 2018/19; Rsolo20: número de indivíduos (*Rotylenchulus reniformis*) por 200 cm^3 de solo quantificado na safra 2019/20; NDVI e NDWI: índices vegetativos na cultura do algodão, avaliados em março de 2020; teores de K, Ca e Mg em $mmol_c/dm^3$; teor de Zn em g/dm^3; prodalg20: produtividade de algodão em caroço (kg/ha) safra 2019/20; prodsoja19: rendimento de grãos de soja (kg/ha) safra 2018/19.

penho produtivo da soja e do algodão. A região mais fértil (zona 3), mesmo com a ocorrência simultânea das três espécies de nematoides, foi a mais produtiva do talhão. A região menos fértil do talhão teve a predominância de *R. reniformis* e foi a menos produtiva do talhão (zona 2). O uso de cultivares de soja e algodão com resistência a *R. reniformis* e a aplicação a taxa variável de calcário, K, Zn e Mn são estratégias importantes para maximizar a produtividade das culturas e minimizar as perdas de produtividade nesse talhão.

4 CONCLUSÕES

Análise multivariada da densidade populacional de nematoides, dos parâmetros de solo e da produtividade das culturas permitiu definir os fatores mais limitantes e estabelecer zonas de manejo com estratégias sitio-especificas baseadas no uso de cultivares com resistência a *R. reniformis* e aplicação à taxa variável de calcário e fertilizantes.

AGRADECIMENTOS

Ao sr. Carlos Ernesto Augustin, proprietário da Sementes Pretovina, por permitir o uso da área de estudo localizada na Fazenda Farroupilha, em Pedra Preta/MT. Ao Instituto Matogrossense do Algodão pelo apoio técnico e financeiro ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

AVENDANO. F.; PIERCE, F. J.; MELAKEBERHAN, H. Spatial analysis of soybean yield in relation to soil texture soil fertility and soybean cyst nematode. **Nematology**, v. 6, n. 4, p. 527-545, 2004. DOI: http://doi.org/10.1163/1568541042665313.

COOLEN, W. A.; D'HERDE, C. J. **A method for the quantitative extraction of nematodes from plant tissue**. Gent: State Agricultural Research Center, 1972. 77 p.

DEBIASI, H.; MORAES, M. T. de; FRANCHINI, J. C.; DIAS, W. P.; SILVA, J. F. V.; RIBAS, L. N. Monitoramento da fertilidade do solo e da ocorrência do nematoide das lesões radiculares em soja no Mato Grosso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., 2011, Uberlândia**. Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas: anais**. Uberlândia: SBCS/UFU/ICIAG, 2011.

DIAS, W. P.; ASMUS, G. L.; SILVA, J. F. V; GARCIA, A.; CARNEIRO, G. E. S. Nematoides. In: ALMEIDA, A. M. R.; SEIXAS, C. D. S. (eds.) **Soja:** doenças radiculares e de hastes e interrelações com o manejo do solo e da cultura. Londrina: Embrapa Soja, 2010. p.173-206.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; DIAS, W. P. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo e da população de Pratylenchus brachyurus. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (eds.). **Agricultura de precisão:** um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 157-161.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; DIAS, W. P.; RAMOS JUNIOR, E. U.; SILVA, J. F. V. Perda de produtividade da soja em área infestada por nematoide das lesões radiculares na região médio norte do Mato Grosso. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (eds.). **Agricultura de precisão:** resultados de um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2014. p. 274-278.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; DIAS, W. P.; RIBAS, L. N.; SILVA, J. F. V.; BALBINOT JUNIOR, A. A. Relação entre atributos de solo, população de nematoide das lesões radiculares e crescimento de plantas de soja. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 1, p. 30-35, 2018. DOI: http://doi.org/10.5965/223811711712018030.

GALBIERI, R.; SILVA, J.; ASMUS, G.; VAZ, C.; LAMAS, F.; CRESTANA, S.; TORRES, E. D.; FARIAS, A.; FALEIRO, V. O.; CHITARRA, L. G.; RODRIGUES, S. M.; STAUT, L. A.; MATOS, E. S.; SPERA, S. T.; DRUCK, S.; MAGALHÃES, C. A. S; OLIVEIRA, A. A. E.; TACHINARDI, R.; FANAN, S.; SANTOS, N. R. R.; SANTOS, T. **Áreas de produção de algodão em Mato Grosso:** nematoides, murcha de

Fusarium, sistemas de cultivo, fertilidade e física de solo. Cuiabá: Instituto Mato-grossense do Algodão, 2014. 16 p.

GARCIA, A.; SILVA, J. F. V.; PEREIRA, J. E.; DIAS, W. P. Rotação de culturas e manejo do solo para controle do nematoide de cisto da soja da soja. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE NEMATOLOGIA (org.). **O nematoide de cisto da soja:** a experiência brasileira. Jaboticabal: Artsigner Editores, 1999. p. 55-70.

GOULART, A. M. C. **Aspectos gerais sobre nematoides das lesões radiculares (gênero Pratylenchus)**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008.

JENKINS, W. R. A rapid centrifugal-flotation technique for separating nematodes from soil. **The Plant Disease Reporter**, v. 48, p. 692, 1964.

KANDJI, S. T.; OGOL, C. K. P. O.; ALBRECHT, A. Diversity of plant-parasitic nematodes and their relationships with some soil physico-chemical characteristics in improved fallows in western Kenya. **Applied Soil Ecology**, v. 18, n. 2, p. 143-157, 2001. DOI: http://doi.org/10.1016/S0929-1393(01)00157-3.

LANCE, G. N.; WILLIAMS, W. T. A general theory of classificatory sorting strategies. I. Hierarchical systems. **Computer Journal**, v. 9, p.373-380, 1967.

MELAKEBERHAN, H.; AVENDAÑO, F. Spatio-temporal consideration of soil conditions and site-specific management of nematodes. **Precision Agriculture**, v. 9, n. 6, p. 341-354, 2008. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-008-9071-3.

MELAKEBERHAN, H.; BIRD, G. W.; GORE, R. Impact of plant nutrition on Pratylenchus penetrans infection of Prunus avium rootstocks. **Journal of Nematology**, v. 29, n. 3, p. 381-388, 1997. PMid:19274171.

MENDES, F. L.; ANTONIO, S. F.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; DIAS,W. P.; MORAES, M. T.; GOULART, A. M. C.; SILVA, J. F. V. Monitoramento de atributos químicos do solo e da ocorrência de Pratylenchus brachyurus em soja no Mato Grosso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, 6., 2012, Cuiabá. **Soja: integração nacional e desenvolvimento sustentável: anais**. Brasília, DF: Embrapa, 2012. 4 p.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. **Vesper 1.62 – spatial prediction software for precision agriculture**. Sidney: Australian Centre for Precision Agriculture/ University of Sydney, 2005.

NAIME, J. M.; VAZ, C. M. P.; MACEDO, A. Automated soil particle analyzer based on gamma ray attenuation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 31, n. 3, p. 295-304, 2001. DOI: http://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00188-5.

PERINA, F. J.; BOGIANI, J. C.; RIBEIRO, G. C.; BREDA, C. E.; FABRIS, A.; SANTOS, I. A. SEIBEL, D. P. **Levantamento e Manejo de Fitonematoides em Algodoeiro no Oeste da Bahia, resultados safra 2016/2017**. Luís Eduardo Magalhães: Fundação Bahia/ABAPA/IBA/Embrapa, 2017. 8 p.

PINHEIRO, J. B.; POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A.; MOREIRA, A. S.; ALVES, M. C.; CAMPOS, V. P. Influência da nutrição mineral na distribuição espacial do nematoide de cisto da soja. **Nematologia Brasileira**, v. 32, p. 270-278, 2008.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project, 2022. Disponível em: http://qgis.osgeo.org. Acesso em: 13 set. 2022.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 285 p.

SARAH, J. L.; OSSÉNI, B.; HUGON, R. Effect of soil pH on development of Pratylenchus brachyurus populations in pineapple roots. **Nematropica**, v. 21, p. 211-216, 1991.

SAS INSTITUTE. **SAS user's guide statistics: version 8.2**. Cary: SAS Institute, 2001. 291 p.

SMITH, G. J.; WIEBOLD, W. J.; NIBLACK, T. L.; SCHARF, P. C.; BLEVINS, D. G. Macronutrient concentrations of soybean infected with soybean cyst nematode. **Plant and Soil**, v. 235, n. 1, p. 21-26, 2001. DOI: http://doi.org/10.1023/A:1011872818069.

SPEKKEN, M. A. R. K.; ANSELMI, A. A.; MOLIN, J. P. A simple method for filtering spatial data. In: **Precision agriculture'13**. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2013. p. 259-266. DOI: http://doi.org/10.3920/9789086867783_032.

TREVATHAN, L. E.; CUAREZMA-TERÁN, J. A.; GOURLEY, L. M. Relationship of plant-nematodes and edaphic factors in Colombian grain sorghum production. **Nematropica**, v. 15, n. 2, p. 145-153, 1985.

34

Variabilidade espacial da atividade micorrízica e sua influência na disponibilidade de fósforo e no rendimento de grãos do milho

Spatial variability of mycorrhizal activity and influence on phosphorus availability and maize (Zea mays) crop productivity

Antônio Luis Santi[1], Larissa Lamperti Tonello[2], Maurício Piccoli Bonatti[3], Eduarda Brizolla[4], Ezequiel Zibetti Fornari[5], Caroline Montanari Giraldi[6], Luís Felipe Rossetto Gerlach[7]

[1] *Professor Doutor, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Ciências Agronômicas e Ambientais, Frederico Westphalen (RS), Brasil, santi_pratica@yahoo.com.br*

[2] *Acadêmico, Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), Brasil, larrisatonello@gmail.com*

[3] *Acadêmico, Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), Brasil, mauricio.bonatti@acad.ufsm.br*

[4] *Acadêmico, Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), Brasil, eduarda.brizolla@acad.ufsm.br*

[5] *Acadêmico, Pós-Graduação em Agronomia, Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), Brasil, ezequiel.fornari@yahoo.com.br*

[6] *Acadêmico, Pós-Graduação em Agronomia, Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), Brasil, carolinegiraldi@hotmail.com*

[7] *Acadêmico, Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), Brasil, lfelipeross@hotmail.com*

RESUMO

A variabilidade da distribuição de fósforo é um problema encontrado na maioria das áreas cultivadas na região Sul do Brasil. A disponibilidade e absorção deste elemento pode ser aumentada por meio da atividade micorrízica. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi diagnosticar a variabilidade dos teores de fósforo no solo e a suas relações com a porcentagem de infecção micorrízica em raízes de milho, e verificar a influência no potencial produtivo da cultura. O estudo foi realizado na região do Planalto Médio do estado do Rio Grande do Sul. Foi estabelecida uma malha amostral de 24 pontos, cada ponto representando 3.300 m^2. As amostras para análise de infecção micorrízica e disponibilidade de fósforo foram coletadas no momento de plena antese da cultura. O rendimento de grãos foi avaliado a partir da coleta das espigas de duas fileiras com 2,5 m de comprimento, mais próximas do ponto amostral. Realizou-se a estatística descritiva das variáveis estudadas. Para verificar a normalidade dos dados, aplicou-se o Shapiro-Wilk, ao nível de 5% de probabilidade. Os dados foram submetidos à análise de matriz de correlação linear de Pearson ($p > 0,05$) para verificar a relação existente entre os parâmetros avaliados. A colonização micorrízica das raízes nos diferentes pontos estudados apresentou grande variabilidade, assim como o teor de fósforo no solo. Foi verificada grande similaridade entre a variabilidade de fósforo no solo e a variabilidade de colonização micorrízica, correlacionando-se com o rendimento de grãos da cultura do milho. Embora necessite mais estudos, há possibilidade de que indiretamente possa-se estimar a variação de mapas de P com a variabilidade da presença de fungos micorrízicos no sistema radicular das plantas de milho.

Palavras-chave: *Zea mays* L.; variabilidade; fósforo; micorriza; disponibilidade; produtividade.

ABSTRACT

The variability of phosphorus distribution is a problem found in most cultivated areas in southern Brazil. The availability and absorption of this element can be increased from mycorrhizal activity. In this sense, this work aimed to diagnose the variability of phosphorus in this soil and its relationship with the percentage of mycorrhizal infection in maize roots (*Zea mays* L.), and to determine the influence on the productive potential of the crop.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000009

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

The study was carried out in the Middle Plateau region of the state of Rio Grande do Sul. A sample of 24 points was established, each point representing 3300 m^2. Samples for analysing mycorrhizal infection and phosphorus availability were taken at the time of full anthesis of the crop. Yield was assessed by collecting the ears of two rows of 2.5 metres long closest to the sampling point. Descriptive statistics were analyzed for the variables studied. To verify the normality of the data, the Shapiro-Wilk was applied, at the level of 5% of probability. The data were evaluated using Pearson's linear correlation matrix (p>0.05) to verify the relationship between the parameters assessed. The colonization of the roots at the different points studied showed great variability, as did the phosphorus content in the soil. A great similarity was verified between the variability of phosphorus in the soil and the variability of mycorrhizal colonization, correlating with the productivity of the maize crop. Although more studies are needed, there is a possibility that a variation in P map can be indirectly estimated with the variability of the presence of mycorrhizal fungi in the root system of maize plants.

Keywords: variability; phosphorus; mycorrhiza; availability; productivity.

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas nutricionais em áreas de cultivo agrícola está relacionado à baixa disponibilidade de fósforo. Elemento que apresenta baixa concentração natural nos solos agrícolas e cuja disponibilidade para as plantas é influenciada por interações com a fração coloidal, como a forte ligação com as argilas (Gatiboni, 2003).

Após a adoção do Sistema de Plantio Direto (SPD), a adubação fosfatada passou a ser utilizada em camadas superficiais do solo, contribuindo para o aumento do teor deste elemento em superfície, ao longo do tempo. Além disso, o aporte superficial de compostos orgânicos no SPD contribuiu para esta variação na distribuição espacial do nutriente entre as camadas do solo (Rheinheimer et al., 1998).

Nesse enfoque, o fósforo é um dos elementos que apresenta maior variabilidade em sua disponibilidade no ambiente de produção, principalmente em solos com textura argilosa, como ocorre na região noroeste do Rio Grande do Sul, caracterizada por uma alta variabilidade horizontal e vertical (Santi et al., 2012).

O crescimento e desenvolvimento das plantas cultivadas tem grande relação com a condição biológica dos solos (Novais; Smyth; Nunes, 2007). Os microrganismos edáficos assumem papel importante para a manutenção da fertilidade do ambiente de produção, promovendo a transformação da matéria orgânica e controlando os processos de mineralização e imobilização dos nutrientes no solo, além de produzir compostos estáveis, denominados substâncias húmicas, importantes para a estabilidade produtiva do solo (De-Polli; Guerra, 1999).

Outro benefício da atividade microbiológica está relacionado à simbiose, como ocorre com as associações mutualistas entre certos fungos do solo e as raízes das plantas. A associação de micorrizas proporciona incrementos na absorção de nutrientes, principalmente de fósforo, aumentando também a tolerância das plantas a estresses e a disponibilidade deste nutriente nas proximidades das raízes (Siqueira, 1994).

O crescimento e desenvolvimento das micorrizas é diretamente afetado pela concentração de P, de forma que o crescimento dos fungos é favorecido quando o teor de P no solo se encontra em níveis baixos ou médios (Purcino *et al.*, 2016).

Nesse contexto, objetivou-se diagnosticar a variação dos teores de fósforo no solo e a relação com a porcentagem de colonização micorrízica em raízes de milho, além de verificar se estas relações impactam no potencial produtivo da cultura.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Fazenda Irmãos Barboza, localizada no município de Não-Me-Toque, região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, Brasil (entre 28°28'15" S a 28°28'00" S, e 52°52'45" W a 52°52'15" W). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cfa subtrocial. As chuvas são regularmente distribuídas em todos os meses do ano, com precipitação pluvial oscilando entre 1.500 mm e 1.750 mm. O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho Típico (Santos *et al.*, 2018) com relevo plano.

Investigou-se uma área cultivada com milho (*Zea mays* L.) em sucessão à aveia-preta (*Avena strigosa*). A cultura foi implantada em 12 de agosto de 2015 a uma profundidade de 5 cm, e o espaçamento entre linhas foi de 0,48 m, com uma população de semeadura de 82.000 sementes ha^{-1}. Utilizou-se o híbrido AG9025 (ciclo superprecoce), adubado com 395 kg da fórmula N-P_2O_5-K_2O 9-25-20 em base e 300 kg de ureia (45% N) dividida em duas aplicações em cobertura, a primeira no estágio fenológico V4 e a segunda em V8.

Foi delimitada uma área experimental de 80.000 m^2, na qual se estabeleceu uma malha amostral composta por 24 pontos, cada ponto representando 3.300 m^2. Utilizou-se o Sistema CR-Campeiro 7 (Laboratório de

Geomática, UFSM), para formação das grades amostrais e transferência das informações para o GPS.

As coletas de solo foram realizadas na profundidade de 0-20 cm, nas entrelinhas da cultura, por meio de uma pá de corte, no momento do florescimento da cultura (97 dias após a semeadura). As amostras foram obtidas pela coleta da fatia central, com 5 cm de largura.

Foi feita a coleta de raízes para análise de cobertura micorrízica também no momento de plena antese da cultura. Em cada ponto amostral coletou-se uma planta, com profundidade de 0-30 cm. Os sistemas radiculares foram lavados em água corrente até apresentarem coloração branca. As amostras foram obtidas pela coleta de 10 g de pelos radiculares. Para conservar a viabilidade dos tecidos radiculares, utilizou-se uma solução de álcool 40%.

O percentual de cobertura micorrízica foi quantificado conforme a metodologia utilizada pelo Laboratório de Análise Microbiológica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), considerando somente a quantidade de fungos micorrízicos presente no tecido.

O rendimento de grãos foi avaliado a partir da coleta das espigas de duas fileiras com 2,5 m de comprimento, mais próximas do ponto amostral, a partir da planta amostrada para análise micorrízica. Utilizou-se uma balança de precisão para quantificação da produção de grãos e do teor de umidade e impurezas.

Realizou-se a estatística descritiva das variáveis estudadas, para se obter as medidas de posição (mínimo, média, máxima) e de dispersão (coeficiente de variação, assimetria e curtose). Para verificar a normalidade dos dados, aplicou-se o teste Shapiro-Wilk, ao nível de 5% de probabilidade.

Conforme os limites propostos por Gomes e Garcia (2002), para avaliação das variabilidades por meio do coeficiente de variação (CV), considera-se como variabilidade baixa (CV≤10%), média (10≤CV≤20%), alta (20≤CV≥30%) e muito alta (CV≥30%).

Os dados foram submetidos à análise de matriz de correlação linear de Pearson (p>0,05) para verificar a relação existente entre os parâmetros avaliados. As análises foram realizadas utilizando o programa Statistical Analysis System – SAS 8.0 (SAS Inc, Cary, USA).

Para melhor entendimento dos resultados, foram gerados mapas temáticos com auxílio do Sistema CR-Campeiro 7. Devido ao reduzido número de pontos avaliados, não foi possível realizar análises geoestatísticas, procedendo-se, portanto, à interpolação dos dados pelo inverso do quadrado da distância, conforme recomendado por Coelho et al. (2009).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir das análises estatísticas das variáveis teor de fósforo no solo, taxa de colonização micorrízica e rendimento de grãos do milho nos pontos amostrais estão apresentados na Figura 1.

Os resultados indicaram uma variação de 20% a 100% de colonização por micorrizas nas raízes das plantas de milho. A disponibilidade de fósforo no solo variou entre 4,40 e 18,10 mg dm^{-3}.

De acordo com Gomes e Garcia (2002), o coeficiente de variação foi alto para as variáveis infecção micorrízica e teor de fósforo, esta última também evidenciada por Santi et al. (2012), em estudo da distribuição horizontal e vertical de fósforo e potássio em área com SPD consolidado.

A porcentagem de colonização por micorrizas não apresentou distribuição normal, confirmando-se pelos valores de assimetria e curtose distantes de zero (Tabela 1).

Para os valores de rendimento de grãos, o coeficiente de variação foi classificado como baixo, e a média foi de 184,97 sc ha^{-1}. O teor de fósforo e o rendimento de grãos do milho seguiram uma distribuição normal, com os valores de assimetria e curtose próximos de zero.

Os resultados obtidos a partir da avaliação dos atributos químicos do solo e de outros macronutrientes estão apresentados na Tabela 2.

O teor de argila variou entre 42% e 66%, caracterizando a textura argilosa do solo da área estudada. Os valores de pH foram compreendidos entre 5,2 e 6,0, com coeficiente de variação classificado como baixo. As variáveis teor de argila e pH apresentaram valores de assimetria e curtose próximos a zero, caracterizando uma distribuição normal.

Para os teores de cálcio e magnésio, o coeficiente de variação foi alto e médio, respectivamente, semelhante ao encontrado por Barbieri; Marques Júnior; Pereira (2008), em estudo da variabilidade espacial de atributos químicos de um argissolo. Para o teste de normalidade, não houve distribuição normal para o Ca, ao contrário do observado para o Mg.

Os resultados referentes ao teste Shapiro-Wilk indicaram normalidade para o teor de matéria orgânica. O coeficiente de variação foi classificado como médio, apresentando uma amplitude de 2,50% a 3,90%. Os níveis de matéria orgânica tendem a não sofrer alterações bruscas quando o solo permanece cultivado sob plantio direto.

Os valores de potássio na área variaram entre 59 e 270 cmol dm^{-3}, com teor médio de 116,91 cmol dm^{-3}. O coeficiente de variação foi classificado como muito alto, fato também observado por Santi et al. (2012),

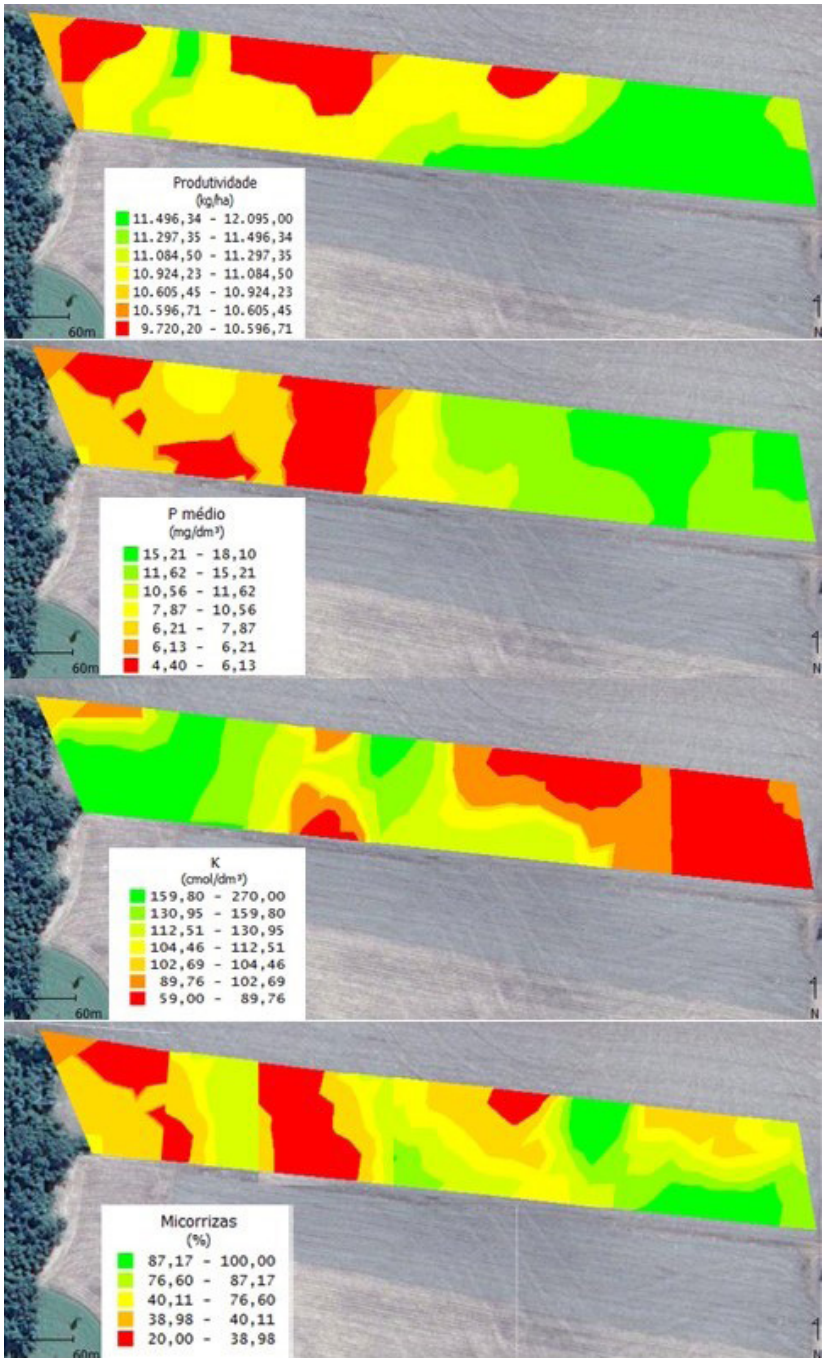


Figura 1. Mapas temáticos da variabilidade do teor fósforo e potássio, colonização micorrízica e rendimento de grãos da cultura do milho.

evidenciando a alta variação desse nutriente em áreas cultivadas com SPD.

Quanto ao teor de enxofre, os valores variaram de 12,9 a 19,0 mg dm^{-3}, enquanto a média foi de 17,02 mg dm^{-3}. O coeficiente de variação foi classificado como baixo. Zanão Júnior *et al.* (2010), em estudo da variabilidade espacial dos teores de macronutrientes em Latossolos conduzidos sob SPD, observaram uma tendência similar à encontrada para este nutriente. Os valores de potássio e enxofre não seguiram uma distribuição normal pelo teste Shapiro-Wilk.

Os resultados referentes à Correlação Linear de Pearson (Tabela 3) indicaram maior significância entre a infecção micorrízica e a disponibilidade de fósforo. Esse resultado demonstra que a associação micorrízica com a cultura do milho pode ser diretamente influenciada pela presença do fósforo no solo.

Nogueira e Cardoso (2000) e Bressan et al. (2001) constataram em seus estudos a interferência do suprimento de P sobre a colonização micorrízica no sistema radicular, de forma que a taxa de colonização aumenta quando há baixos teores de P, e acaba sendo reduzida

Tabela 1. Estatística descritiva da porcentagem de colonização micorrízica, disponibilidade de fósforo e rendimento de grãos da cultura do milho nos pontos amostrais.

Parâmetro estatístico	Micorrizas	Fósforo	Rendimento de grãos
	(%)	(mg dm^{-3})	(sc ha^{-1})
Mínimo	20,00	4,40	162,00
Média	69,16	10,37	184,97
Máximo	100,00	18,10	201,59
Mediana	80,00	10,85	184,78
Moda	100,00	6,20	162,00
DP[1]	31,19	4,37	9,26
Variância	973,18	19,17	85,88
CV (%)[2]	45,10	42,22	5,01
Cs[3]	-0,47	0,29	-0,41
Ck[4]	-1,37	-1,16	0,50
W[5]	0,82*	$0,92^{ns}$	$0,97^{ns}$

[1]Desvio-Padrão; [2]Coeficiente de variação; [3]Coeficiente de assimetria; [4]Coeficiente de curtose; [5]Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: *significativo em níveis de p<0,05 e ns não significativo. Quando for significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos químicos do solo e de outros macronutrientes.

Parâmetros estatísticos	Argila	pH	Ca	Mg	M.O.	K	S
	%		mg dm^{-3}	mg dm^{-3}	%	mg dm^{-3}	mg dm^{-3}
Mínimo	42,00	5,20	5,10	1,70	2,50	59,00	12,90
Média	56,29	5,53	6,75	2,25	3,04	116,91	17,02
Máximo	66,00	6,00	10,20	3,10	3,90	270,00	19,00
Mediana	57,00	5,55	6,30	2,15	3,00	101,50	17,30
Moda	57,00	5,30	5,20	2,10	2,90	59,00	18,30
DP[1]	5,96	0,23	1,42	0,39	0,35	49,13	1,55
Variância	35,06	0,06	2,02	0,15	0,12	24,14	2,41
CV (%)[2]	10,60	4,25	21,09	17,46	11,75	42,02	9,13
Cs[3]	-0,51	0,29	1,14	0,46	0,54	1,54	-0,91
Ck[4]	-0,04	-1,01	0,54	-0,57	0,11	2,85	0,55
W[5]	$0,96^{ns}$	$0,93^{ns}$	0,87*	$0,95^{ns}$	$0,95^{ns}$	0,86*	0,91*

[1]Desvio-Padrão; [2]Coeficiente de variação; [3]Coeficiente de assimetria; [4]Coeficiente de curtose; [5]Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, onde: *significativo em níveis de p<0,05 e ns não significativo. Quando for significativo indica que a hipótese para distribuição normal é rejeitada.

quando os teores de P estão altos. Entretanto, em estudos realizados por Sylvia e Neal (1990) observaram que a colonização radicular não foi afetada pela adição de P quando as plantas eram deficientes em N pelas espécies *Glontus etunicatum* Becker e Gerdemann, mas aumentou a colonização radicular por *Gigaspora margarita* Gerdemann e Trappe, ou seja, o resultado obtido neste estudo pode estar relacionado à deficiência de N para a planta e a diferentes espécies de micorrizas presentes no solo.

Diante disso, é possível estabelecer uma estimativa de níveis de fósforo no solo correlacionando com a atividade micorrízica. Os teores de potássio e de ar-

Tabela 3. Correlação Linear de Pearson entre os atributos químicos do solo, infecção micorrízica e o rendimento de grãos de milho.

	Micorriza	RG	K	Ca	Mg	S	Argila	M.O
P	**0,62****	0,31	**-0,48***	-0,12	-0,29	-0,01	-0.12	-0,23
Micorriza		0,32	-0,33	0,00	0,02	0,36	-0.24	0,12
RG			**-0,39***	-0,13	-0,26	0,16	-0.24	0,23
K				**0,49***	**0,52****	-0,13	-0.13	0,31
Ca					**0,83****	-0,03	-0.10	**0,41***
Mg						-0,02	-0.25	**0,54****
S							-0.18	0,17
Argila								**-0,49****

RG = rendimento de grãos; * significativo a p≤0,05; **significativo a p ≤0,01.

gila apresentaram correlações negativas com a porcentagem de colonização micorrízica.

No mapa de disponibilidade de fósforo (Figura 1), pode-se observar a alta variabilidade espacial dos teores na área estudada. Santi et al. (2012) observaram esta mesma condição em lavouras não manejadas com Agricultura de Precisão, de forma que a adoção de correções à taxa variada contribuiu para a redução da heterogeneidade de distribuição do elemento no ambiente de produção.

O mapa de colonização micorrízica também apresentou grande variabilidade espacial, assemelhando-se visualmente com o mapa de fósforo. Enquanto o mapa de rendimento de grãos demonstrou menor rendimento de grãos em locais com menor disponibilidade de fósforo e menor taxa de colonização por micorrizas.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. A colonização micorrízica das raízes nos diferentes pontos estudados apresentou grande variabilidade, assim como o teor de fósforo no solo.
2. Foi verificada grande similaridade entre a variabilidade de fósforo no solo e a variabilidade de colonização micorrízica, correlacionando-se com o rendimento de grãos da cultura do milho.
3. Embora necessite mais estudos, há possibilidade de que indiretamente possa-se estimar a variação de mapas de P com a variabilidade da presença de fungos micorrízicos no sistema radicular das plantas de milho.

5 REFERÊNCIAS

BARBIERI, D. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos de um argissolo para aplicação de insumos à taxa variável em diferentes formas de relevo. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 4, p. 645-653, 2008. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-69162008000400004.

BRESSAN, W.; SIQUEIRA, J.O.; VASCONCELOS, C.A.; PURCINO, A.A.C. Fungos micorrízicos e fósforo, no crescimento, nos teores de nutrientes e na produção do sorgo e soja consorciados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 2, p. 315-323, 2001. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2001000200015.

COELHO, E. C.; SOUZA, E.G.; URIBE-OPAZO, M.A.; NETO, R.P. Influência da densidade amostral e do tipo de interpolador na elaboração de mapas temáticos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 1, p. 165-174, 2009. DOI: http://doi.org/10.4025/actasciagron.v31i1.6645.

DE-POLLI, H.; GUERRA, J. G. M. C. N e P na biomassa microbiana do solo. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo:** ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Gênesis, 1999. p. 389-411.

GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 247 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

NOGUEIRA, M. A.; CARDOSO, E. J. B. N. Produção de micélio externo por fungos micorrízicos arbusculares e crescimento da soja em função de doses de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 2, p. 329-338, 2000. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-06832000000200010.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 276-374.

PURCINO, A. A. C.; BRESSAN, W.; SIQUEIRA, J. O.; VASCONCELLOS, C. A. **Desenvolvimento do sistema radicular do milho (Zea mays L.):** efeitos da micorriza e do P. Brasilia, DF: Embrapa, 2016. Disponível em: ht-

tps://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/484022/desen-volvimento-do-sistema-radicular-do-milho-zea-mays-l-efeitos-da-micorriza-e-do-p. Acesso em: 28 ago. 2016.

RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J.; LUPATINI, G. C.; SANTOS, E. J. S. Modificações em atributos químicos de solo arenoso sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 4, p. 713-721, 1998. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400017.

SANTI, A. L.; FIORIN, J. E.; COCCO, K. L. T.; CHERUBIN, M. R.; EITELWEIN, M. T.; AMADO, T. J. C.; HAUSCHILD, F. E. G. Distribuição horizontal e vertical de fósforo e potássio em área manejada com ferramentas de Agricultura de Precisão. **Revista Plantio Direto**, v. 129, p. 18-25, 2012.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 2018. 355 p.

SIQUEIRA, J. O. Micorrizas arbusculares. In: ARAÚJO, R. S.; HUNGRIA, M. (eds.). **Microrganismos de importância agrícola**. Brasília, DF: Embrapa, 1994. p. 151-194.

SYLVIA, D. M.; NEAL, L. H. Nitrogen affects the phosphorus response of VA mycorrhiza. **The New Phytologist**, Lancaster, v. 115, n. 2, p. 303-310, 1990. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00456.x.

ZANÃO JÚNIOR L. A.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C.; PEREIRA, J. M. A. Variabilidade espacial dos teores de macronutrientes em latossolos sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 389-400, 2010. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200012.

Seleção de bandas espectrais e índices de vegetação para identificação de déficit nutricional em cultivos de algodão e milho

35

Selection of spectral bands and vegetation indices to identify nutritional deficits in cotton and maize crops

Ziany Neiva Brandão[1], Álvaro Vilela de Resende[2], Célia Regina Grego[3], Jeferson Giehl[4], Luciano Shozo Shiratsuchi[5]

[1] *Pesquisador, Embrapa Algodão, Campina Grande (PB), Brasil, ziany.brandao@embrapa.br*
[2] *Pesquisador, Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas (MG), Brasil, alvaro.resende@embrapa.br*
[3] *Pesquisa, Embrapa Agricultura Digital, Unicamp, Campinas (SP), Brasil, celia.grego@embrapa.br*
[4] *Doutorando, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa (MG), jefergiehl@hotmail.com*
[5] *Associate Professor, Louisiana State University, Baton Rouge (LA), EUA, LShiratsuchi@agcenter.lsu.edu*

RESUMO

Os índices de vegetação (IVs) baseados na refletância espectral das regiões do vermelho e infravermelho próximo têm sido usados há anos na agricultura de precisão. Embora exista indicação da aplicabilidade de comprimentos de onda específicos, na maioria das vezes a faixa espectral de trabalho depende do sensor disponível, não permitindo alterações nos IVs por parte do pesquisador/usuário. O objetivo desse estudo foi analisar a possibilidade de uso dos comprimentos de onda centrais nas faixas do verde, azul, vermelho, subida do vermelho (ou *red-edge*), e infravermelho próximo (NIR) para fins de monitoramento nutricional das culturas do algodão (*Gossypium hirsutum* L.) e do milho (*Zea mays* L.), usando sensores de fácil acesso aos produtores do Brasil. Foram avaliadas seis diferentes bandas espectrais obtidas de imagens dos sensores do satélite Sentinel-2, em dois estádios fenológicos do milho e do algodoeiro, usando quatro IVs calculados em cada estádio de crescimento, para obter indicativos do estado nutricional e predizer a produtividade das culturas na região central do Brasil. Foram implantados experimentos *on-farm* nos estados de Goiás e Minas Gerais, com algodão e milho, respectivamente. O algodão foi semeado em sistema de plantio direto (SPD) e tratado com quatro doses de N, Ca e Mg. O milho em SPD foi adubado com sete níveis de adubação N-P_2O_5-K_2O, na presença ou ausência de braquiária em consórcio. Foram coletados ainda dados *in situ* ao longo do crescimento das plantas e ao final foram gerados mapas de produtividade usando colhedoras adequadas às culturas em estudo. Os dados foram submetidos à análise de variância unidirecional e à geoestatística. Com as imagens de satélite foram gerados quatro IVs usando os comprimentos de onda do visível, *red-edge* e infravermelho próximo (NIR de 770 nm a 1100 nm). Dentre os IVs, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) mostrou bom desempenho, mas o GARI (*Green Atmospherically Resistant Vegetation Index)* apresentou desempenho superior, discriminando em até 18% a mais situações de déficit nutricional. Um único IV não foi suficiente para a correta classificação da imagem, sendo necessária uma análise com pelo menos dois IVs para resultar numa acurácia superior a 62%.

Palavras-chave: imagens de satélite; monitoramento nutricional; infravermelho próximo; agricultura de precisão.

ABSTRACT

Vegetation indices (VIs) based on the spectral reflectance of the red and near-infrared regions have been used for years in precision agriculture. Although there are indications of the applicability of specific wavelengths, most of the time the working spectral range depends on the available sensor, not allowing changes in the IVs by the researcher/user. The objective of this study was to analyze the possibility of using central wavelengths in the green, blue, red, red-edge, and near-infrared (NIR) bands in the nutritional monitoring of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) and maize (*Zea mays* L.) crops, using sensors that are easily accessible to producers in Brazil. Six different spectral bands obtained from images/sensors of the Sentinel-2 satellite were evaluated in two different maize and cotton phenological stages, using four IVs calculated at each growth stage. The bands and IVs were used to obtain information on the nutritional status and to predict the yield of cotton and maize in the central

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000015

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

region of the country. On-farm experiments were carried out in the states of Goiás and Minas Gerais, with cotton and maize, respectively. Cotton was sown in a no-tillage system and treated with four doses of N, Ca, and Mg. No-till maize received seven levels of NPK, in the presence or absence of brachiaria grass in intercropping. In situ data were collected during plant growth and yield maps were generated using harvesters suitable for each crop. Data were subjected to one-way analysis of variance and geostatistics. Four IVs were generated using visible, red-edge, and near-infrared (NIR from 770 to 1100nm) wavelengths from the satellite images. The NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index)* performed well, but the GARI (*Green Atmospherically Resistant Vegetation Index)* performed better, discriminating nutritional deficit conditions by up to 18% more. A single IV was not sufficient for the correct classification of the image, requiring an analysis with at least two IVs to result in an accuracy greater than 62%.

Keywords: satellite imagery; nutritional monitoring; near infrared; precision agriculture.

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento das características biofísicas das plantas, em diferentes estádios de desenvolvimento fenológico das culturas, é essencial para o manejo eficiente destas. No entanto, a variabilidade espaçotemporal da disponibilidade de nutrientes no solo e da disponibilidade hídrica, influenciadas por outros parâmetros ambientais que afetam o crescimento das plantas, torna um desafio a tarefa de estimar o potencial produtivo das lavouras. Alterações espaciais e temporais na estimativa de produtividade são perceptíveis quando as plantas são monitoradas por meio de sensores proximais e orbitais, e usando índices de vegetação (IVs), que são algoritmos derivados da transformação espectral da refletância captada por sensores como imagem, em comprimentos de onda específicos. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) vem sendo usado há décadas em estudos de culturas agrícolas para estimar/quantificar a produção de biomassa (House, 1974; Lumbierres et al., 2017). Ele mede a diferença entre comprimentos de onda do infravermelho próximo (NIR) e vermelho (Red), e é amplamente utilizado no monitoramento de culturas em grandes áreas (Haboudane et al., 2004; Nagy et al., 2021), tendo se tornado o referencial, quando da criação de novos IVs.

Sensores a bordo do satélite Sentinel-2 entregam informações consistentes e frequentes, sendo úteis na avaliação de sistemas agrícolas, monitoramento florestal, queimadas ou degelo nos polos. Os sensores do Sentinel-2 fornecem bandas multiespectrais estreitas e *red-edge*. Muitas pesquisas têm usado o *red-edge* para estimar o teor de clorofila e o *status* de nitrogênio das plantas (Sharma et al., 2015; Sharma; Ritchie, 2015). No presente estudo, IVs, como o NDRE (*Normalized Difference Red-Edge Index*), o EVI (*Enhanced Vegetation Index*), e o GARI (*Green Atmospherically Resistant Vegetation Index*), foram usados e avaliados na predição da produtividade do algodão em caroço e de grãos do milho, comparados ao NDVI.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram avaliadas seis bandas espectrais obtidas de sensores/imagens do Sentinel-2, em dois diferentes estádios fenológicos do algodoeiro e do milho segunda safra, usando quatro IVs calculados em cada estádio de crescimento, para obter indicativos do estado nutricional e predizer a produtividade dessas culturas, a partir de experimentos *on-farm*.

Os experimentos foram iniciados na safra 2019/2020, em áreas com Latossolo Vermelho Amarelo muito argiloso que vêm sendo utilizadas com culturas anuais e manejadas em sistema de plantio direto (SPD). Os estudos foram realizados *on-farm*, tendo em vista o suporte técnico oferecido nas fazendas. Para o algodão, a área experimental de 30,8 ha foi implantada na Fazenda Pamplona, em Cristalina-GO, cujas coordenadas geográficas são: 16º10'15,03"S; 47º38'02,78"O, com altitude média de 1.012 m. Para o milho, foi usada uma área experimental de 25,2 ha na Fazenda Decisão, em Unaí-MG, cujas coordenadas geográficas são: 16º24'49,03"S; 47º17'55,68"O, com altitude média de 992 m. As áreas ficam em municípios vizinhos e distantes cerca de 47 km entre si, permitindo a obtenção de imagens por satélite na mesma data.

No algodão foram aplicadas quatro doses de nitrogênio, cálcio e magnésio, conforme a Tabela 1, em três épocas: semeadura, 28 e 56 dias após a emergência (DAE). No milho, foram realizados sete tratamentos de adubação, como descritos na Tabela 1, aplicados ao sistema soja/milho segunda safra, com ou sem a inclusão da braquiária ruziziensis (*Urochloa ruziziensis*) como planta de cobertura em consórcio com o milho.

Em ambos os experimentos, as diferentes opções de adubação foram distribuídas no campo mediante uso de equipamentos para aplicação em taxa variada (ATV). Os cultivos foram estabelecidos em sequeiro, com definição prévia de grades de amostragem demarcando os pontos centrais de cada parcela. A disposição das parcelas nos experimentos seguiu o delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições.

Tabela 1. Tratamentos de adubação estabelecidos em experimentos *on-farm* com algodoeiro na Fazenda Pamplona, GO, e com milho segunda safra na Fazenda Decisão, MG. Ano agrícola 2019/2020.

Tratamentos: Algodão (N, Ca, Mg em kg ha^{-1})	Tratamentos: Milho segunda safra (N-P_2O_5-K_2O)
1. Controle. Tratamento 1: (12N; 1,05Ca; 0,5Mg)	1. Tratamento 1: Controle sem adubação
2. Tratamento 2: (102N; 9,30Ca; 4,50Mg)	2. Tratamento 2: (77N, 0 P_2O_5; 0 K_2O)
3. Tratamento 3: (190N; 17,30Ca; 8,50Mg)	3. Tratamento 3: (71N; 31 P_2O_5; 67K_2O)
4. Tratamento 4: (276N; 25,30Ca; 12,50Mg)	4. Tratamento 4: (102N; 44 P_2O_5; 96K_2O)
	5. Tratamento 5: (118N; 50 P_2O_5; 90K_2O)
	6. Tratamento 6: (132N; 57 P_2O_5; 125 K_2O)
	7. Tratamento 7: (153N; 65 P_2O_5; 117 K_2O)

As dimensões das parcelas foram definidas conforme a largura de trabalho do maquinário disponível em cada fazenda (Figura 1), e visando que tivessem tamanho suficiente para a obtenção de imagens com resolução espacial adequada ao monitoramento por sensoriamento remoto, usando os satélites Sentinel 2A e 2B.

Mapas de prescrição dos tratamentos de adubação com as respectivas doses de fertilizantes foram gerados e enviados às fazendas para serem aplicadas em cada cultivo. Para a geração dos *shapes* de contorno das áreas, foi utilizado o software Trackmaker® e compatibilizados para reconhecimento pelos sistemas de aplicação de insumos em taxa variável instalados no maquinário. A confecção dos mapas de prescrição foi realizada no QGis 2.18, software SIG *opensource*.

Durante o ciclo das culturas em 2020, foram adquiridas imagens do Sentinel-2 para datas distintas, 14 de fevereiro e 31 de março para o algodão (aos 80 e 120 DAE), enquanto para o milho foram de 31 de março e 19 de maio (20 e 69 DAE). Foram escolhidas as bandas espectrais mais adequadas para discriminação das respostas aos tratamentos e da produtividade. A refletância espectral para plantas de algodão e milho apresentam espectro típico de plantas verdes, com um pico de média intensidade no verde, e alta refletância nos comprimentos de onda do infravermelho próximo. Para o solo nu, a refletância é bem distinta e apresenta valores muito pequenos.

Para escolha das bandas espectrais, um teste de significância foi realizado para todas as bandas, com B8 (NIR) e B2 (Blue) apresentando significância muito alta ($p<0,001$), e bandas do vermelho (B4-Red), *red-edge* (B5) e NIR (B7) com significância para 0,01. Já a banda do verde (B3) apresentou significância média ($p<0,05$). As imagens foram corrigidas radiometricamente e retificadas para o sistema de coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*). Após conversões e transformações dos dados em refletância, os índices de vegetação foram calculados usando as seguintes equações (Shiratsuchi et al., 2014):

NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R)/(\rho_{NIR} + \rho_R) \quad (1)$$

Rouse et al. (1973)

NDREb (*Normalized Difference Red-Edge Index*)

$$NDREb = \left(\rho_{NIR(B7)} - \rho_{Red-Edge(B5)}\right)/\left(\rho_{NIR(B7)} + \rho_{Red-Edge(B5)}\right) \quad (2)$$

Barnes et al. (2000)

EVI (*Enhanced Vegetation Index*)

$$EVI = 2,5(\rho_{NIR} - \rho_R)/(1 + \rho_{NIR} + 6\rho_R - 7,5\rho_B) \quad (3)$$

Huete et al. (1988)

GARI (*Green AtmosphericallyResistantVegetation Index*)

$$GARI = \frac{\rho_{NIR} - \left[\rho_G - \gamma(\rho_B - \rho_R)\right]}{\left[\rho_{NIR} + \left(\rho_G - \gamma(\rho_B - \rho_R)\right)\right]} \quad (4)$$

Gitelson et al. (1996)

em que ρ_x representa a refletância, e x as bandas *G* (Green-B3), *R* (Red-B4), *B* (Blue-B2) e *NIR* (Near-Infrared- B8 e B7).

Foram realizadas avaliações *in situ* de monitoramento das culturas nas mesmas datas das imagens, com avaliação do vigor vegetativo e medição de altura de planta, além de leituras de clorofilômetro onde no algodoeiro foi usado o SPAD-502 Plus® da Konica-Minolta. As leituras desses sensores serviram para validação dos valores de NDVI obtidos através das imagens de satélite.

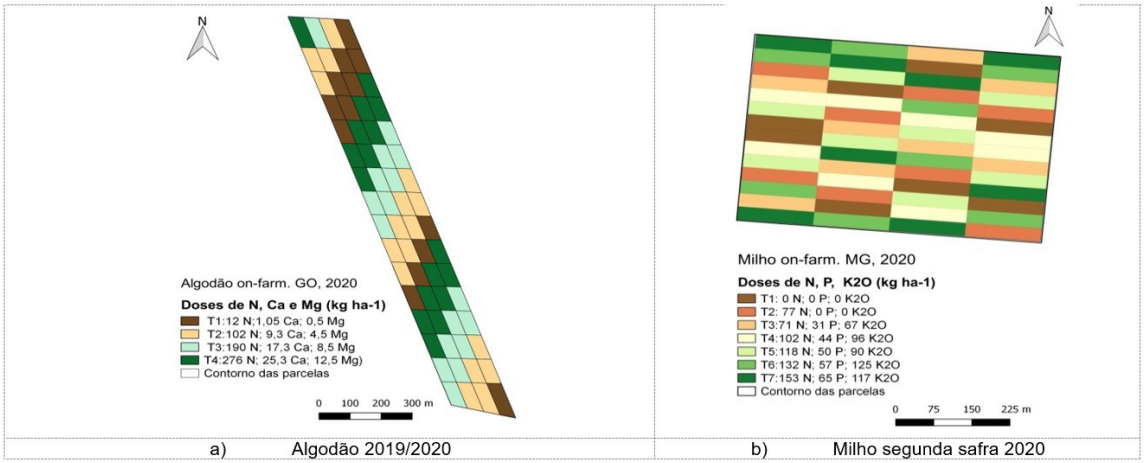


Figura 1. Experimentos *on-farm* apresentando os mapas de prescrição dos tratamentos de adubação para o algodoeiro na Fazenda Pamplona, GO, e o milho segunda safra na Fazenda Decisão, MG. Ano agrícola 2019/2020.

Para obtenção da média, valor máximo, mínimo, assimetria e curtose, distribuição de frequência e coeficiente de variação (CV), os dados foram submetidos à análise estatística descritiva. O teste de Kolmogorov-Smirnov, no qual os valores de assimetria e curtose devem ser próximos de zero para distribuições normais, foi utilizado para verificar a normalidade da distribuição de frequência dos dados. Os coeficientes de variação foram avaliados com base nos critérios de Warrick e Nielsen (Oliver; Webster, 2014), que classificam como baixo (< 12%), regular (12% a 60%) e alto (> 60%).

Semivariogramas experimentais foram construídos a partir dos dados para avaliar a dependência espacial, sendo ajustados a um modelo matemático, seguindo a teoria das variáveis regionalizadas (Oliver; Webster, 2014). As semivariâncias foram calculadas pela Equação (6), com posterior interpolação utilizando o software geoestatístico GEOEST (Vieira et al. , 2002).

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2\,N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \qquad (5)$$

em que $N(h)$ é o número de pares dos valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$ separados pelo vetor h.

Segundo Vieira et al. (2002), γ (h) aumenta com a distância h até um patamar, que é o valor máximo em que a semivariância se estabiliza, correspondendo à distância limite de dependência espacial. Semivariogramas que expressaram dependência espacial foram ajustados ao melhor modelo matemático. Após o ajuste e obtenção dos parâmetros de dependência espacial, efeito pepita (C0), variância estrutural (C1) e alcance (a), mapas foram gerados por dados interpolados por krigagem ordinária, com variância mínima e sem tendência (Oliver; Webster, 2014). Os resultados foram apresentados como mapas bidimensionais elaborados no software QGis, representando a distribuição espacial dos valores de produtividade e IVs.

Foram realizadas colheitas mecanizadas, com monitoramento da produtividade e geração de mapas georreferenciados com os dispositivos das colhedoras. Antes da colheita mecânica, foram realizadas coletas manuais para validação das produtividades. No algodoeiro foram coletadas amostras padrão em 20 plantas dentro do raio de 10 m em torno do ponto central georreferenciado de cada parcela. No milho, para avaliação do rendimento de grãos, foram colhidas, quatro linhas de três metros de comprimento na área central das parcelas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O NDVI foi sensível à variação nas respostas aos tratamentos pelas duas culturas, mas apresentando tendência à saturação desde as primeiras medições, quando o índice de cobertura vegetada (ou índice de área foliar-IAF) ainda era inferior a 2 para o algodão e 1 para o milho. A curvatura apresentada nos gráficos nas Figuras 2a e 2c demonstram essa tendência, quando os IVs foram usados como preditores da produtividade nas medições iniciais.

Os IVs obtidos a partir dos comprimentos de onda de 560 nm ou 490 nm (bandas verde ou azul), quando combinados com o infravermelho próximo, produziram os melhores resultados para todas as épocas de medição. O GARI não apresentou saturação para as duas culturas em estudo, com coeficientes de determinação superiores a 62% para as épocas de maior IAF e acima de 50% já na primeira medição. Na Figura 2, é possível verificar também que o NDRE, baseado no *red-edge*, teve comportamento superior para o algodão, mas não se mostrou um bom indicador para o milho, não distinguindo as respostas aos tratamentos.

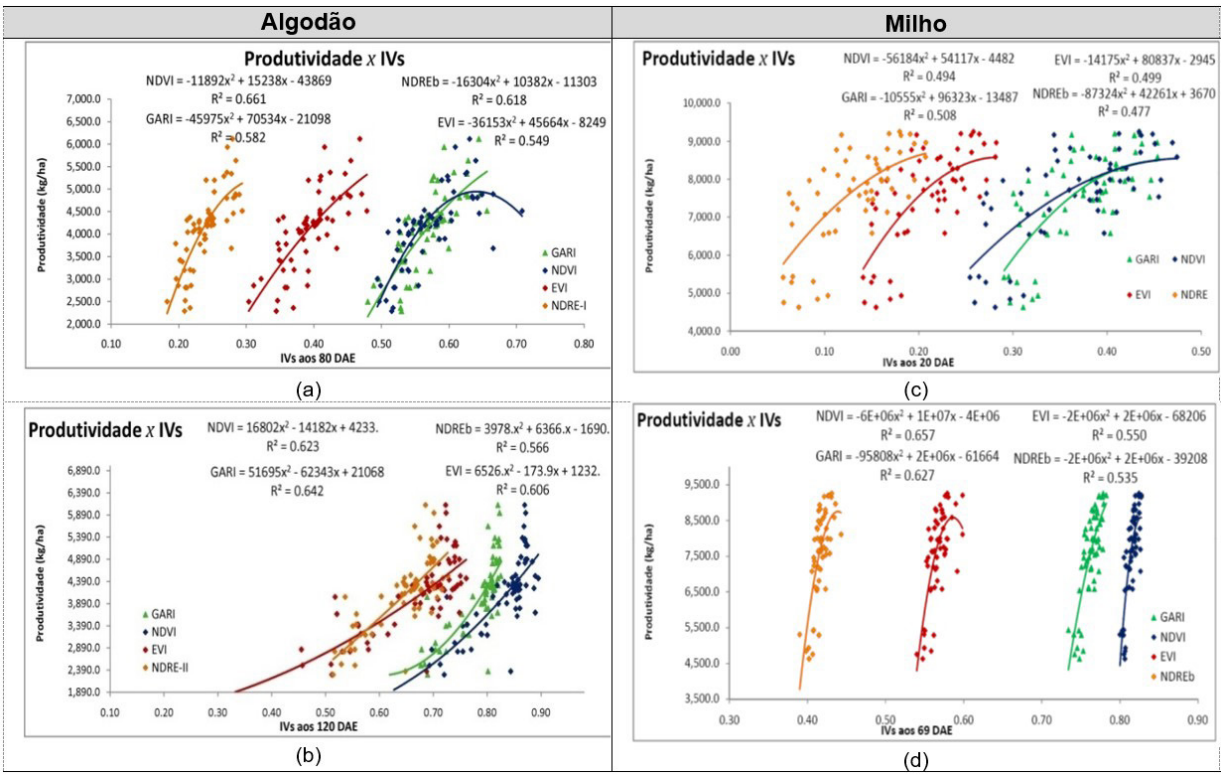


Figura 2. Comportamento dos Índices de Vegetação (IVs) como preditores da produtividade em duas épocas de medição para o algodão na Fazenda Pamplona, GO (a e b) e para o milho na Fazenda Decisão, MG (c e d). Ano agrícola 2019/2020.

Após análise geoestatística, os mapas gerados com interpolação dos dados por krigagem representaram bem a distribuição espacial do estado nutricional para o algodoeiro, especialmente quando o IAF era menor, na primeira medição, como mostrado na Figura 3. Na segunda medição, com plantas altas, o NDVI representou melhor o déficit nutricional na parte sul do mapa (Figura 3e), seguido pelo NDRE (Figura 3f), provavelmente por seus valores máximos não terem ultrapassado 90%, o que geraria saturação, conforme reportado por Gitelson et al. (2003).

Ainda na Figura 3, verifica-se que a distribuição espacial da produtividade foi mais bem representada pelos IVs aos 80 DAE, quando foi possível diferenciar bem os tratamentos aplicados, especialmente pelo NDVI e pelo NDRE.

Para o milho, o comportamento foi similar ao observado no algodoeiro, com a primeira época de avaliação (20 DAE) sendo melhor para diferenciar os efeitos dos tratamentos, utilizando a krigagem ordinária como método de interpolação (Figura 4). Embora os mapas dos IVs na primeira medição tenham representado melhor a resposta vegetativa aos tratamentos, nessa fase não houve boa associação com a produtividade, possivelmente pela pouca cobertura de folhas do milho, ficando mais sujeito à interferência da refletância do solo na determinação dos IVs. Na segunda medição (69 DAE), entretanto, apesar da maior cobertura foliar, houve confundimento dos tratamentos, conforme pode ser observado pela conformação na parte central dos mapas interpolados por krigagem ordinária do EVI e NDRE, enquanto nos mapas NDVI e GARI já é possível identificar duas áreas laterais com menor rendimento que a área central do mapa, coincidindo com o mapa da produtividade. Isso se deve à proximidade de tratamentos com pouca diferenciação na refletância.

Índices de vegetação obtidos a partir de imagens de satélite podem auxiliar na discriminação de efeitos da adubação sobre o desenvolvimento vegetativo e o potencial de rendimento na colheita. Entretanto, constatou-se que o processamento dos dados e os resultados podem ficar mais consistentes se as dimensões das parcelas experimentais forem maiores, ou se a alocação no campo permitir que parcelas com mesmo tratamento fiquem próximas, como no caso da área de estudo com algodão (Figuras 1a e 3), de modo a diminuir a interferência da refletância de tratamentos diferentes posicionados no entorno.

Como reflexo do comportamento das duas culturas frente aos tratamentos, os coeficientes de correlação de Pearson (r) entre o rendimento estimado a partir dos mapas de colheita e o determinado na avaliação manual foram de 0,80 e 0,82 para o algodoeiro e para o milho, respectivamente.

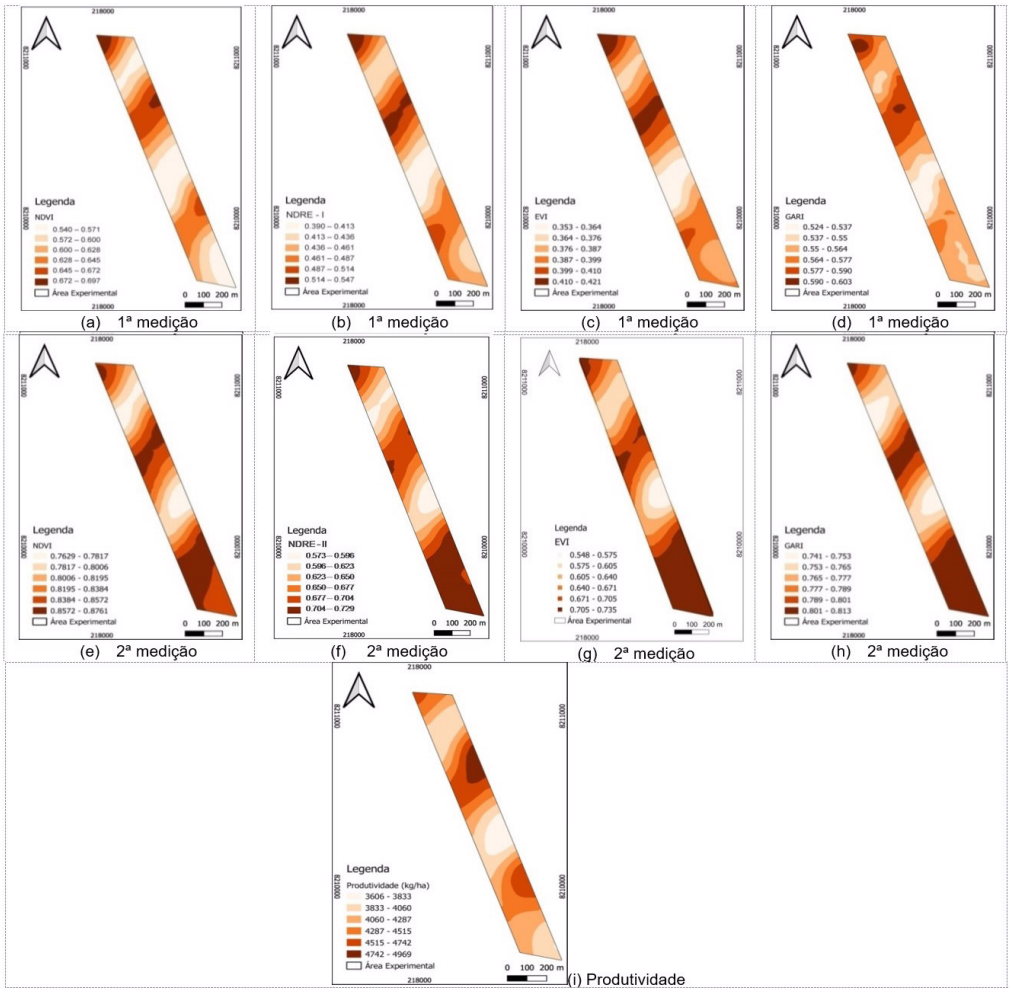


Figura 3. Mapas dos índices de vegetação e de produtividade do algodoeiro, gerados por krigagem ordinária, a partir de experimento *on-farm*, em duas épocas de medição (80 e 120 DAE), na Fazenda Pamplona, GO. Ano agrícola 2019/2020.

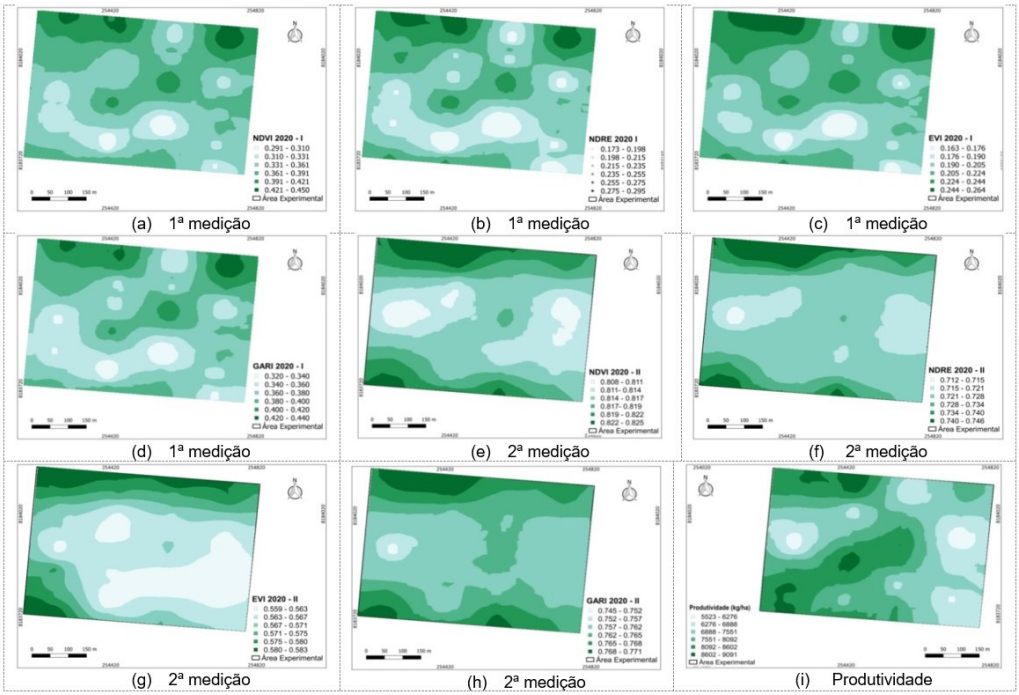


Figura 4. Mapas dos índices de vegetação e de produtividade do milho segunda safra, gerados por krigagem ordinária, a partir de experimento *on-farm*, em duas épocas de medição (20 e 69 DAE), na Fazenda Decisão, MG. Ano agrícola 2019/2020.

De forma análoga, os dados do mapa de índice de vegetação NDVI derivados das imagens de satélite apresentaram boa correlação com as leituras feitas a campo com o clorofilômetro. No algodoeiro, a correlação do NDVI com o índice SPAD foi de 76% aos 120 DAE e de 79% com a produtividade no mesmo estádio fenológico e com o rendimento de grãos (r = 0,77) do milho segunda safra 2020.

4 CONCLUSÕES

Os índices de vegetação com melhor capacidade de predição da produtividade foram os que incluíram as bandas do azul e/ou verde do satélite Sentinel-2, a exemplo do GARI, que apresentou coeficientes de determinação de 64% e 63%, para o algodoeiro e para o milho, respectivamente, na época de maiores índices de área foliar dessas culturas. Confirmou-se, também, a adequação do NDVI como indicador para o monitoramento do desenvolvimento vegetativo e do potencial de produção em resposta ao manejo da adubação nessas culturas.

Dentre os IVs, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) mostrou bom desempenho, mas o GARI (*Green Atmospherically Resistant Vegetation Index*) apresentou desempenho superior, discriminando em até 18% a mais situações de déficit nutricional. Um único IV não foi suficiente para a correta classificação da imagem, sendo necessária uma análise com pelo menos dois IVs para resultar numa acurácia superior a 62%.

AGRADECIMENTOS

Aos gerentes e funcionários da Fazenda Pamplona e Fazenda Decisão. À rede de Agricultura de Precisão da Embrapa. À Fundação Agrisus (PA 2484/18), pelo suporte financeiro complementar a esta iniciativa.

REFERÊNCIAS

BARNES, E. M.; CLARKE, T. R.; RICHARDS, S. E.; COLAIZZI, P. D.; HABERLAND, J.; KOSTRZEWSKI, M.; WALLER, P.; CHOI, C.; RILEY, E.; THOMPSON, T.; LASCANO, R. J.; LI, H.; MORAN, M. S. **Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground-based multispectral data**. In: 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, Bloomington. **Proceedings [...]**. Bloomington: ISPA, 2000.

GITELSON, A. A.; GRITZ, Y.; MERZLYAK, M. N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. **Journal of Plant Physiology**, v. 160, n. 3, p. 271-282, 2003. DOI: http://doi.org/10.1078/0176-1617-00887.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 289-298, 1996. DOI: http://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7.

HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; PATTEY, E.; ZARCO-TEJADA, P. J.; STRACHAN, I. B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p. 337-352, 2004.

HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988. DOI: http://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X.

LUMBIERRES, M.; MÉNDEZ, P. F.; BUSTAMANTE, J.; SORIGUER, R.; SANTAMARÍA, L. Modeling biomass production in seasonal wetlands using MODIS NDVI land surface phenology. **Remote Sensing**, v. 9, n. 4, p.1-18, 2017.

NAGY, A.; SZABÓ, A.; ADENIYI, O.D.; TAMÁS, J. Whea yield forecasting for the tisza river catchment using landsat t 8 NDVI and SAVI Time series and reported crop statistics. **Agronomy**, v. 11, n. 4, p. 652, 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/agronomy11040652.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, v. 113, n. 1, p. 56-69, 2014. DOI: http://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. **Proceedings [...]**. Washington: NASA, 1973. v.1, p. 309-317. Disponível em: https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614: Acesso em: 2 ago. 2022.

SHARMA, L. K.; BU, H.; DENTON, A.; FRANZEN, D. W. Active-optical sensors using red NDVI compared to red edge NDVI for Prediction of corn grain yield in North Dakota, U.S.A. **Sensors**, v. 15, n. 11, pp. 27832-27853, 2015.

SHARMA, B.; RITCHIE, G. L. High-throughput phenotyping of cotton in multiple irrigation environments. **Crop Science**, v. 55, n. 2, p. 958-969, 2015. DOI: http://doi.org/10.2135/cropsci2014.04.0310.

SHIRATSUCHI, L. S.; BRANDÃO, Z. N.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. C.; DUCATI, J. R.; OLIVEIRA, R. P.; VILELA, M. F. Sensoriamento remoto: conceitos básicos e aplicações na agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (eds.). **Agricultura de precisão:** resultados de um novo olhar. Brasília, DF : Embrapa, 2014. pp. 58-73. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/113644/1/4218.pdf. Acesso em: 27 set. 2022.

VIEIRA, S. R.; MILLETE, J. A.; TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D. Handbook for Geostatistical analysis of variability in soil and meteorological paramaters. In: ALVAREZ, V. H. (ed.). **Tópicos em Ciência do Solo II.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002, p. 1-45.

36 Ferramentas para monitoramento do vazio sanitário da soja por imagens multiespectrais orbitais

Tools for monitoring soya sanitary void using multispectral orbital images

Jean-Jacques Georges Soares de Groote[1], Lucas Prado Osco [2], Alessandro da Silva Oliveira[3], Lucio André de Castro Jorge[4]

[1] *Professor, Centro Universitário Moura Lacerda, Ribeirão Preto (SP), Brasil, lucasosco@unoeste.br*
[2] *Professor, Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE), Presidente Prudente (SP), Brasil, lucasosco@unoeste.br*
[3] *Fiscal Estadual Agropecuário, Agência de Defesa Sanitária da Bahia (ADAB), Salvado (BA), Brasil, alessandro.oliveira1@adab.ba.gov.br*
[4] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, lucio.jorge@embrapa.br*

RESUMO

Dentre as atividades de monitoramento necessárias, a identificação de infringência do período conhecido como "vazio sanitário" é uma das que mais necessitam da integração com dados de sensoriamento remoto, bem como a ocorrência de pragas. O vazio sanitário é definido como um período anual em que os produtores agrícolas, cujos principais cultivos em suas áreas são baseados nas culturas de soja, não podem semear ou manter plantas de soja, seja em qualquer fase de seu ciclo fenológico, em sua propriedade. Essa ação tem por objetivo reduzir o inóculo de doenças, e, portanto, deve-se cumprir a prática com rigor. Todavia, o monitoramento por meio de inspeção a campo dessas propriedades é uma tarefa trabalhosa e dispendiosa. Como alternativa, o uso contínuo de imagens orbitais pode auxiliar os órgãos gestores a identificar, previamente, a infração, inclusive quantificando a área de vegetação cultivada nesses locais. Esse tipo de atividade auxilia o técnico em campo com relação a averiguação das infrações, permitindo rapidez ao processo e a tomada de decisão. Neste estudo, é apresentado um modelo de trabalho que, utilizando de tecnologias livres e de baixo custo computacional, monitore áreas agrícolas em nível local e regional, identificando a infração ou não adesão à prática de vazio sanitário e de ocorrência de pragas. Para isso foram utilizadas técnicas de processamento digital de imagem e comparado o método com modelos baseados em aprendizagem de máquina para a identificação de possíveis plantas dentro de áreas descampadas. Esse modelo utiliza uma abordagem de regressão múltipla sobre bandas multiespectrais de reflectância para caracterizar a proporção de vegetação versus vazio sanitário, com dados provenientes de talhões em diferentes estágios de desenvolvimento e áreas de vazio sanitário. Os espectros obtidos pelo Sentinel 2 demonstraram consistência com bandas de solo e vegetação verificadas em inspeções locais. O modelo de trabalho proposto consiste em uma abordagem automatizada, em que retorna com alta acurácia a segmentação de áreas cultivadas que descumpram a prática de vazio. Espera-se que as informações apresentadas auxiliem estudos futuros com a construção e proposição de metodologias úteis para o monitoramento agrícola, dentro das práticas de agricultura de precisão e que adotem a abordagem de baixo custo computacional e pouco supervisionada.

Palavras-chave: processamento digital de imagem; Google Earth Engine; modelagem.

ABSTRACT

Among the necessary monitoring activities, identifying violations of the period known as the 'sanitary void' is one those that most require the integration with remote sensing data, as well as the occurrence of pests. The sanitary void is defined as an annual period during which agricultural producers, whose main crops are soybean-based, cannot sow, or maintain soybean plants at any stage of their phenological cycle on their property. This action aims to reduce the inoculum of diseases and the practice must therefore be strictly adhered to. However, monitoring these properties through field inspections is a labour-intensive and expensive task. As an alternative, the continuous use of orbital images can help management bodies to preemptively identify violations, including quantifying the cultivated vegetation area in these locations. This type of activity assists field technicians to ascertain infractions, speeding up the process and decision-making. This study presents a working model that,

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000020

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

using free and low-cost computational technologies, monitors agricultural areas at local and regional levels, identifying violations or non-adherence to the sanitary void practice and the occurrence of pests. For this, digital image processing techniques were used, and the method was compared with models based on machine learning to identify possible plants in cleared areas. This model uses a multiple regression approach on multispectral reflectance bands to characterize the proportion of vegetation versus sanitary void, with data from plots at different stages of development and fallow areas. The spectra obtained by Sentinel 2 showed consistency with soil and vegetation bands verified in local inspections. The proposed working model consists of an automated approach, which returns highly accurate segmentation of cultivated areas that do not comply with the fallow practice. It is hoped that the information presented will help future studies with the construction and proposal of useful methodologies for agricultural monitoring, within the practices of precision agriculture, thus adopting a low computational cost and unsupervised approach.

Keywords: digital image processing; Google Earth Engine; modelling.

1 INTRODUÇÃO

O vazio sanitário para uma cultura é um período contínuo onde produtores não devem semear nem manter plantas vivas. Para a soja, é um período contínuo de 90 dias determinado pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa), publicado por meio de portarias específicas (Brasil, 2022). O objetivo deste período é reduzir a introdução de doenças, de modo a minimizar seus impactos negativos durante a safra seguinte, permitindo maior controle de riscos associados à proliferação de doenças.

A implantação efetiva dos períodos de vazio sanitário depende da gestão adequada por parte das fazendas, sendo que sua adequação é verificada por órgãos específicos. Esse monitoramento envolve vastas regiões de lavouras, o que pode ser realizado de forma efetiva por meio de imagens orbitais. Satélites coletam dados multiespectrais do visível ao infravermelho próximo, possibilitando análises realizadas com softwares que identificam traços de vegetação em meio a diferentes tipos de solo (Jensen, 2014). Para a detecção do vazio sanitário, plataformas como o Earth Engine da empresa Google (Earth Engine, 2022a) possibilitam o desenvolvimento de métodos numéricos e sua aplicação em tempo útil para análise e monitoramento, tanto pelos gestores quanto pelos inspetores.

O Earth Engine tem como destaque o fornecimento de um catálogo de imagens de satélites e dados geoespaciais de escala planetária, e um ambiente de desenvolvimento de aplicações baseadas em sistemas de servidores em processamento paralelo de alto desempenho. Essa plataforma permite a integração de dados remotos de diversas plataformas orbitais, sendo dentre elas as imagens obtidas por meio dos sensores MSI, embarcados nos satélites Sentinel 2A e 2B (Earth Engine, 2022b). Recentemente, diversos estudos com as bandas espectrais registradas por esse sensor vêm sendo desenvolvidos para fins de agricultura de precisão, evidenciando a importância da tecnologia no setor (Weiss et al., 2020; Choudhary et al., 2022; Ni et al., 2021; Liu et al., 2020; Wuyun et al., 2022).

Este trabalho apresenta os resultados de uma pesquisa em que foram desenvolvidos processos para identificar o vazio sanitário em lavouras georreferenciadas. A classificação foi baseada nos dados da constelação de satélites Sentinel 2 (Sentinel 2, 2022) da Comunidade Europeia e Agência Espacial Europeia (European Space Agency, 2022). Com imagens obtidas de forma aberta e resolução entre 10 e 20 m, dados do espectro de reflectância foram obtidos em períodos quinzenais em talhões georreferenciados de acordo com dados do oeste da Bahia. A pesquisa envolveu tanto o desenvolvimento da metodologia quanto a aplicação das soluções para a detecção do vazio sanitário.

O método adotado envolve técnicas de correlações múltiplas com base nas bandas multiespectrais do visível ao infravermelho, cobrindo a faixa de 490 a 865 nm. Para a disponibilização dos resultados foram desenvolvidos aplicativos interativos para a web, abertos aos usuários com acesso a um link compartilhado. Por meio desse aplicativo é possível escolher talhões tabelados e inspecionar o cumprimento do vazio sanitário ao longo de uma linha temporal.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da técnica de detecção do vazio sanitário apresentada neste trabalho foram utilizados dados dos satélites Sentinel 2 e da plataforma de desenvolvimento online do Google Earth Engine. Nesta seção são detalhados esses sistemas, e o método de regressão utilizado para estabelecer uma forma de inferir se os dados de cada pixel das imagens orbitais representam o vazio sanitário, vegetação, ou uma combinação linear destes por meio do espectro de reflectância.

Administrado pela Comunidade Europeia e a Agência Espacial Europeia (ESA), os satélites Sentinel 2a e 2B

captam imagens multiespectrais da Terra, em alta resolução, em revisitas de cinco dias. As bandas dos sensores permitem dados do visível com 4 bandas, do infravermelho de ondas curtas, 6 bandas, e dados para correções atmosféricas com 3 bandas. As resoluções variam de 10 a 60 m (Tabela 1).

Tabela 1. Bandas e resolução do espectro de reflectância dos satélites Sentinel 2.

Banda	Descrição	Resolução (m)
B1	Aerosols	60
B2	Blue	10
B3	Green	10
B4	Red	10
B5	Red Edge 1	20
B6	Red Edge 2	20
B7	Red Edge 3	20
B8	NIR	10
B8A	Red Edge 4	20
B9	Water Vapor	60
B11	SWIR 1	20
B12	SWIR 2	20
AOT	Aerosol Optical Thickness	10
WVP	Water Vapor Pressure.	10
QA20	Always Empty	20
QA60	Cloud Mask	60

Fonte: Sentinel Online (2022).

O Earth Engine é uma plataforma online disponibilizada pela Google Cloud Infrastructure para pesquisas científicas com imagens da superfície terrestre (Figura 1). A plataforma é integrada a diversos satélites, incluindo os Sentinel 2, utilizados neste trabalho. O desenvolvimento de códigos para análise de imagens georreferenciadas é realizado em Javascript, com possibilidade de integração em outros sistemas por meio de uma API em Python. Para esta pesquisa, foram desenvolvidos códigos de análise na própria plataforma, e os resultados disponibilizados por meio de um provedor de aplicativos, onde apenas o link é requerido para acesso ao público interessado.

Para esta pesquisa, os dados de reflectância (0-1) fornecidos pelos satélites Sentinel 2 foram importados e disponibilizados em forma de tabela a partir de cada pixel das regiões georreferenciadas. A resolução em metros quadrados utilizados na pesquisa, relativo à banda, cobre o intervalo de bandas entre 490 e 865 nanômetros, variando de 10 a 20 m^2.

Adjunta à plataforma GGE, outra plataforma integrada está sendo proposta para incorporar as informações processadas por meio do GGE e implementar uma interface mais customizável e de fácil acesso aos usuários que necessitarem cadastrar novas propriedades. A fase inicial desse sistema é desenvolvida a partir de um banco de dados em PostgreSQL que contém o armazenamento dos dados cadastrais dos usuários e seus níveis de acesso e das propriedades existentes. Uma versão inicial da mesma também é apresentada neste trabalho e discutida.

Tendo como base a forma da distribuição do espectro, foi implementado um método de segmentação considerando que nos talhões o espectro é uma

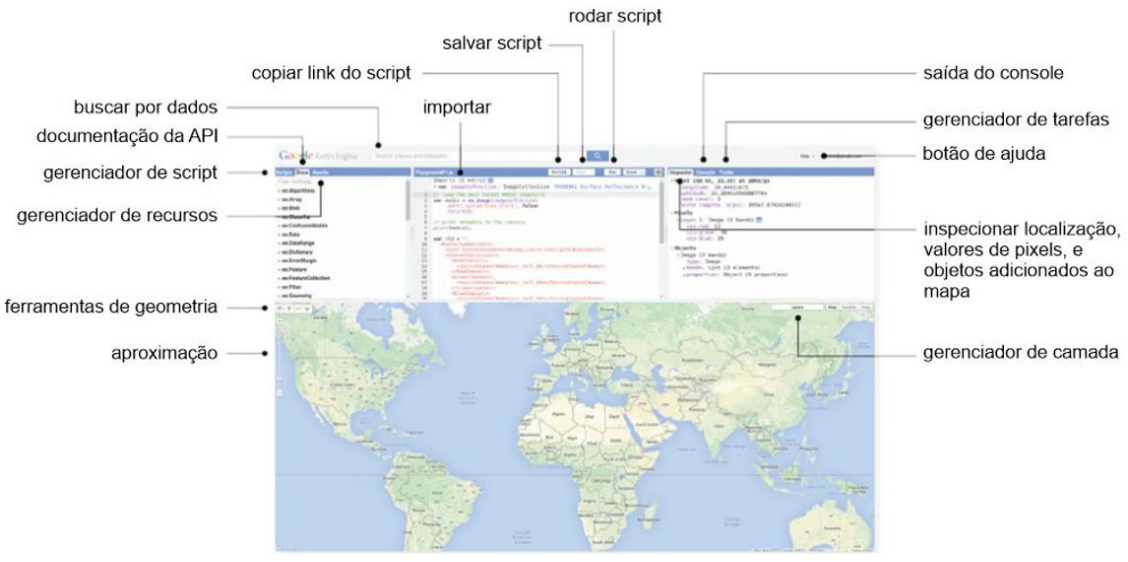


Figura 1. Plataforma Earth Engine. Fonte: Earth Engine (2022c).

combinação linear de vegetação (Novo, 2010) e solo (Alvarenga et al., 2003) devido à ocupação do solo em diferentes proporções. Para determinar os coeficientes dessa combinação utilizou-se uma regressão linear de múltiplas variáveis (Loesch; Hoeltgebaum, 2017), implementada no Earth Engine, e na linguagem Python na plataforma Colab da Google, com a biblioteca GEE.

Na análise de regressão múltipla, um conjunto de variáveis independentes é utilizado para a previsão de uma única variável dependente. Cada preditor possui um peso que indica sua contribuição relativa à predição total. A equação de regressão para a reflectância *r* pode ser escrita como função da vegetação e vazio, na forma:

$$r = a + b_1 r_{veg} + b_2 r_{vazio}$$

Para as variáveis dependentes representando a reflectância da vegetação r_{veg} e vazio sanitário r_{vazio} (solo), tem-se os coeficientes,

$$b_1 = \frac{\Sigma r_{vazio}^2 \Sigma\left(r_{veg} \cdot r\right) - \Sigma\left(r_{veg} r_{vazio}\right)\Sigma\left(r_{veg} r\right)}{\Sigma r_{veg}^2 \Sigma r_{vazio}^2 - \left(\Sigma r_{veg} r_{vazio}\right)^2}$$

$$b_2 = \frac{\Sigma r_{veg}^2 \Sigma\left(r_{vazio} \cdot r\right) - \Sigma\left(r_{veg} r_{vazio}\right)\Sigma\left(r_{vazio} r\right)}{\Sigma r_{veg}^2 \Sigma r_{vazio}^2 - \left(\Sigma r_{veg} r_{vazio}\right)^2}$$

Nestas expressões, para a reflectância observada, os valores de r_{veg} e r_{vazio} foram obtidos empiricamente, com valores medidos nos talhões fornecidos pelas fontes do projeto, como apresentado na Tabela 2.

Para a classificação de cada pixel da imagem do talhão, um limiar foi estabelecido como referência para determinar as classes {vazio sanitário, vegetação}, de acordo com a relação de proporção entre os coeficientes de cada classe.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O espectro de reflectância obtido pelas câmeras dos satélites Sentinel 2 passam por um processo de calibragem antes de serem disponibilizadas. A calibração radiométrica converte o sinal elétrico medido pelo instrumento em radiância física medida no sensor. Para exemplificar a compatibilidade dos dados orbitais com medidas *in situ* por espectroradiômetros, na Figura 2 é apresentada a curva de reflectância da soja obtida a partir de experimentos realizados por Gürtler et al. (2018), comparados com os valores

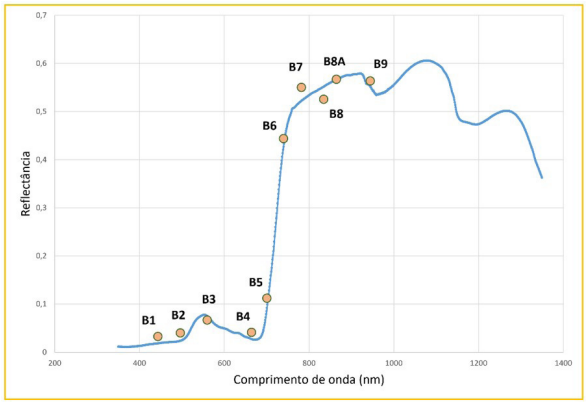


Figura 2. Curva do espectro de reflectância da soja saudável comparado com os pontos obtidos por valores médios das bandas {B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B8a} do Sentinel 2 em amostras de talhões.

Tabela 2. Dados médios das bandas obtidos a partir de amostras em pivôs cadastradas.

Banda	nm	Descrição	Reflectância vegetação (0-1)	Reflectância solo (0-1)
B1	443	Violeta	0,024	0,076
B2	490	Azul	0,028	0,091
B3	560	Verde	0,120	0,051
B4	665	Vermelho	0,159	0,036
B5	705	Visível e IR Próximo	0,194	0,089
B6	740	Visível e IR Próximo	0,216	0,293
B7	783	Visível e IR Próximo	0,238	0,397
B8	842	Visível e IR Próximo	0,239	0,391
B8A	865	Visível e IR Próximo	0,265	0,429

médios por banda medidos com imagens do Sentinel 2 no Earth Engine (EE).

Por meio da correlação, foram determinados os pesos de espectro de solo e vegetação, gerando um índice a partir da proporção desses pesos. Com esse índice foi estabelecido um limiar a partir da análise especialista de pesquisadores das instituições que definem o conceito de vazio. Este estudo foi realizado por meio de comparações de imagens registradas em campo, coordenadas com aquisições de dados dos satélites.

O código foi implementado na plataforma EE em Javascript, com o cálculo da correlação realizada pixel a pixel. Filtros foram definidos por meio de funções que associam os valores do conjunto de bandas B: {B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B8A} a um índice {0, 1}, onde 1 significa vazio sanitário. Para cada talhão georreferenciado, uma média do vazio é calculada e introduzida como componente para *charts* interativos com dados distribuídos em uma linha temporal predefinida. Por meio desses *charts*, uma curva de vazio sanitário pode ser explorada pelos gestores, fornecendo a proporção de área coberta por vegetação com relação ao vazio por meio de um índice que varia de 0 (cobertura vegetal completa) a 1 (vazio sanitário), como apresentado na Figura 3.

Figura 3. Evolução temporal do vazio sanitário para um talhão. O índice 0 indica cobertura vegetal em todo talhão, variando até 1, com vazio sanitário.

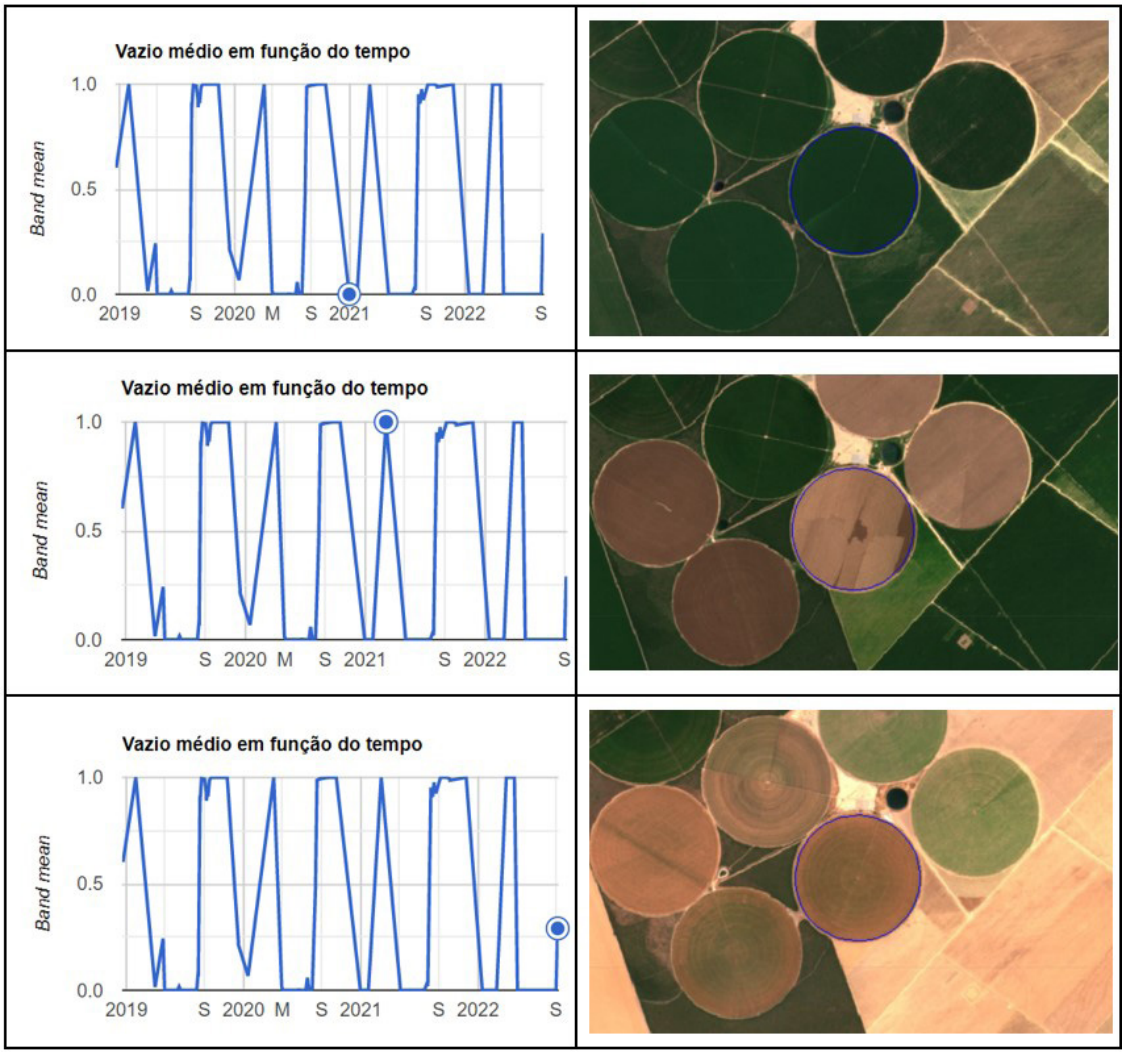


Figura 4. Exemplos dos resultados para indicação de vazio sanitário e cobertura vegetal para diferentes índices de vazio sanitário.

As imagens utilizadas para o *chart* são inicialmente filtradas para remover aquelas com cobertura de nuvem e cirrus. Desta forma, ao escolher uma imagem no *chart* por meio de uma seleção por clique, a imagem do período será disponibilizada, assim como a taxa de área com vazio sanitário identificado.

Os resultados para um talhão específico podem ser observados nos exemplos da Figura 4. Foram apresentados resultados para índice 0.00, 0.29 e 1.00, indicando variações de cobertura vegetal.

Para disponibilização dos resultados, foi desenvolvido um aplicativo do sistema Earth Engine (Figura 5). Esse aplicativo contém um painel para interface com o usuário, com processamento realizado em tempo real.

O aplicativo disponibiliza as seguintes funcionalidades:

- Os talhões cadastrados são obtidos por meio de um seletor, e um gráfico temporal é disponibilizado para este talhão.
- O gráfico mostra o histórico do índice de vazio calculado de acordo com o método de regressão.
- As imagens selecionadas foram escolhidas da coleção de imagens do Sentinel 2, a partir de um filtro de cobertura de nuvens, com limiar de cobertura de 5%.
- O *chart* é interativo, permitindo a escolha da data a ter as imagens apresentadas.
- As imagens são fornecidas no padrão RGB.

O sistema de monitoramento e alerta de vazio sanitário foi desenvolvido disponibilizando por meio de um banco de dados em PostgreSQL o armazenamento dos dados cadastrais dos usuários e seus níveis de

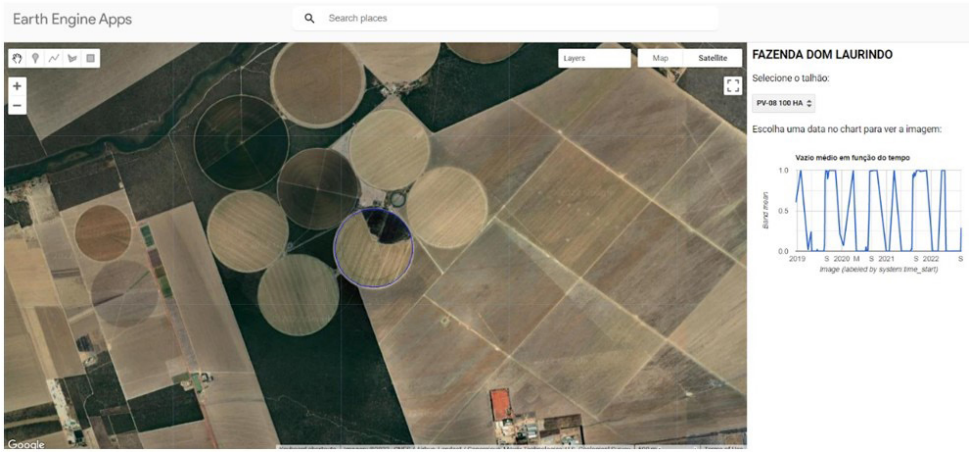


Figura 5. Aplicativo desenvolvido para acesso rápido à detecção de vazio sanitário.

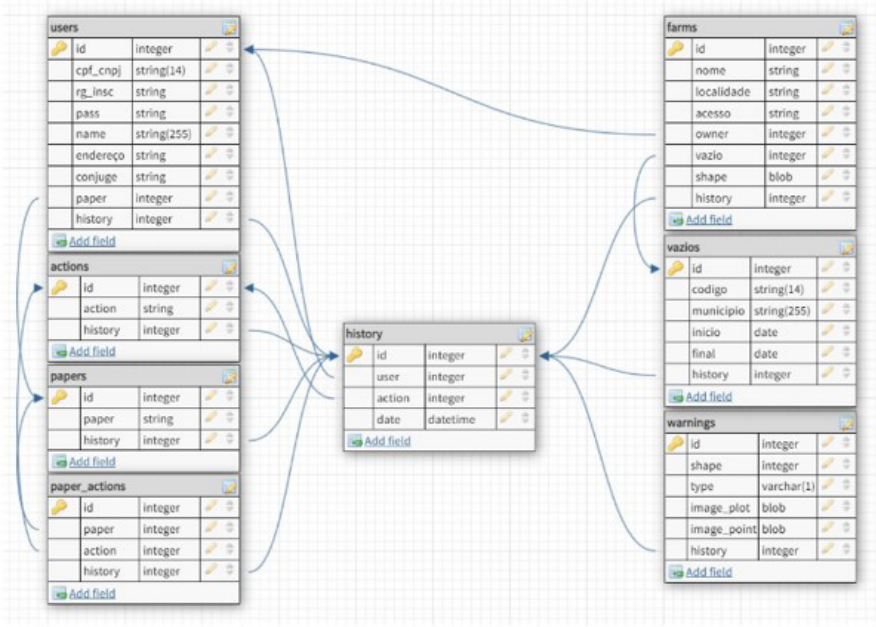


Figura 6. Modelo de dados implementado na plataforma de monitoramento online.

Figura 7. Plataforma desenvolvida para monitoramento do vazio sanitário da soja.

acesso, dados cadastrais das propriedades, dados dos municípios e suas datas de vazio sanitário, arquivos de dados geoespaciais em forma de vetor usado por sistemas de informações geográficas contemplando as delimitações das propriedades e municípios do estado e relatórios das detecções de cultivos (Figura 6).

Para acesso remoto, seja por sistemas, plataformas e aplicativos, foi desenvolvido um serviço de API REST com controle de acesso disponibilizado por tokens Bearer com expiração temporal em Django. A plataforma online, estará disponível na página da ADAB, Agência de Defesa Sanitária da Bahia, desenvolvida em Javascript utilizando React e Typescript e hospedado pela NEXT da Vercel, apresenta um painel de visualização com mapas, utilizando Leaflet, dos vazios sanitários municipais e suas detecções em cores, destacando as presenças de irregularidades facilitando uma depuração do fiscal ao realizar o monitoramento (Figura 7).

Neste painel podem ser filtrados cada município, assim como a data de detecção do algoritmo. Em cada município são exibidas as propriedades vinculadas e com a data da detecção selecionada, quais propriedades apresentam irregularidades. Ao selecionar cada propriedade é possível acessar a data e o tipo do cultivo detectado assim como a imagem recortada na data da detecção e o mesmo recorte processado pelo algoritmo, e também um relatório em PDF elaborado pelo algoritmo contendo os dados e justificativas estatísticas que ratificam a detecção.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um processo eficaz e de baixo custo baseado em sensoriamento remoto, para auxiliar a identificação de infringência do período de vazio sanitário. Sua aplicação objetiva a redução do inóculo de doenças, auxiliando os órgãos competentes na gestão de vastas áreas de cultivo. A plataforma Earth Engine se mostrou eficaz e de grande relevância para estudos para identificação de vazio sanitário. Entre os aspectos relevantes para este trabalho estão a velocidade de processamento para quantidades massivas de dados, integração com coleções de mapas e quantidade de informações pixel a pixel fornecidas em tempo relativamente curto.

Para caracterizar a proporção de vegetação/vazio sanitário, a regressão múltipla sobre bandas multiespectrais de reflectância foi implementada, considerando informações de talhões com vegetação em diferentes etapas de desenvolvimento e vazio sanitário. Como resultado, foi disponibilizada aos gestores uma forma de mensurar a proporção de vegetação nos talhões. O espectro obtido por meio do Sentinel 2 apresentou resultados consistentes com bandas de solo e vegetação verificadas em inspeções locais. Para acesso aos dados foi desenvolvido um aplicativo que permite a usuários finais acessar as informações processadas em tempo real, utilizando formatos de painéis com elementos interativos para disponibilização da evolução temporal por talhão, incluídos em páginas na web. Desta forma podem ser realizadas análises por gestores no manejo e controle das plantações a partir dos métodos implementados.

Outro dispositivo foi desenvolvido para acesso virtual, visando um sistema de alerta para controle de fiscalização e monitoramento, assim como a base de um sistema de notificação pela agência. Esse acesso é realizado por meio de uma plataforma com controle de acesso de usuários, cadastro de propriedades com informações geoespaciais delimitantes das áreas de cultivo, histórico datados pelos processamentos deste trabalho e seus relatórios estatísticos ratificando a detecção e compondo a notificação endossada pela confirmação in loco pelos agentes. Foi possível verificar que os processos e métodos adotados levaram a resultados acurados, que podem ser utilizados para indicar o correto manejo em fazendas

conforme as legislações locais para o vazio sanitário. O método pode ser explorado para análises que buscam diferenciar tipos de plantações e pode também ser aperfeiçoado com a utilização de imagens de satélites com maior resolução, precisão e menor tempo de entrega dos dados.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, B. S.; D'ARCO, E. N. Z. O.; ADAMI, M.; FORMAGGIO, A. R. *O ensino de conceitos e práticas de espectrorradiometria laboratorial: estudo de caso com solos do estado de São Paulo.* In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais** [...]. Belo Horizonte: SBSR, 2003. p. 739-747.

BRASIL, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, SECRETARIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA. Portaria SDA Nº 516. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 18, 01 fev. 2022.

Choudhary, K.; SHI, W.; DONG, Y.; PARINGER, R. Random Forest for rice yield mapping and prediction using Sentinel-2 data with Google Earth Engine. **Advances in Space Research**, vol. 70, n. 8, p. 2443-2457, 2022.

EARTH ENGINE. **Google Earth Engine**. 2022b. Disponível em: https://earthengine.google.com/. Acesso em: 27 set. 2022.

EARTH ENGINE. **Platform.** 2022a. Disponível em: https://earthengine.google.com/platform/. Acesso em: 19 set. 2022.

<eref>EARTH ENGINE. Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2ª. 2022c. Disponível em: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR. Acesso em: 28 set. 2022.</eref>

EUROPEAN SPACE AGENCY. **Sentinel 2**. 2022. Diponível em: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2. Acesso em 27 set. 2022.

Gürtler, S.; SOUZA FILHO, C. R.; SANCHES, I. D.; ALVES, M. N.; OLIVEIRA, W. J. Determination of changes in leaf and canopy spectra of plants grown in soils contaminated with petroleum hydrocarbons. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. *146*, p. 272-288, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.09.011.

Jensen, J. R. **Remote sensing of the environment:** *an earth resource perspective*. 3. ed. New Delhi: Pearson Education India, 2014. 613 p.

LIU, L.; XIAO, X.; QIN, Y.; WANG, J.; XU, X.; HU, Y.; QIAO, Z. Mapping cropping intensity in China using time series Landsat and Sentinel-2 images and Google Earth Engine. **Remote Sensing of Environment**, v. 239, p. 111624, 2020.

Loesch, C.; Hoeltgebaum, M. **Métodos estatísticos multivariados**. São Paulo: Saraiva Educação SA, 2017.

NI, R.; TIAN, J.; LI, X.; YIN, D.; LI, J.; GONG, H.; ZHANG, J.; ZHU, L.; WU, D. An enhanced pixel-based phenological feature for accurate paddy rice mapping with Sentinel-2 imagery in Google Earth Engine. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 178, p. 282-296, 2021.

Novo, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto***: princípios e aplicações. 2. ed.* São Paulo: Edgard Blücher, 2010.

SENTINEL ONLINE. **S2 Applications**. 2022. Disponível em: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial. Acesso em: 28 set. 2022.

WEISS, M.; JACOB, F.; DUVEILLER, G. Remote sensing for agricultural applications: a meta-review. **Remote Sensing of Environment**, v. *236*, p. 111402, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402.

WUYUN, D.; SUN, L.; SUN, Z.; CHEN, Z.; HOU, A.; CRUSIOL, L. G. T.; REYMONDIN, L.; CHEN, R.; ZHAO, H. Mapping fallow fields using Sentinel-1 and Sentinel-2 archives over farming-pastoral ecotone of Northern China with Google Earth Engine. **GIScience & Remote Sensing**, v. 59, n. 1, p. 333-353, 2022.

37

Análise e sugestão de abordagem para filtragem de mapas de produtividade para a cultura do algodão

Analysing and suggesting an approach for filtering yield maps for the cotton crop

Eduardo Antonio Speranza[1], Carlos Manoel Pedro Vaz[2], Julio Cezar Franchini dos Santos[3], Ricardo Yassushi Inamasu[4], Ivani de Oliveira Negrão Lopes[5], Ladislau Marcelino Rabello[6]

[1] *Analista, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, eduardo.speranza@embrapa.br*
[2] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, carlos.vaz@embrapa.br*
[3] *Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, julio.franchini@embrapa.br*
[4] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, ricardo.inamasu@embrapa.br*
[5] *Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, ivani.negrao@embrapa.br*
[6] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, ladislau.rabelo@embrapa.br*

RESUMO

Este trabalho propõe uma abordagem para a filtragem de mapas de produtividade para a cultura do algodão considerando a inclusão de uma etapa de pré-processamento a partir de dados relacionados à trajetória da colheitadeira, eliminando dados que podem ter sido obtidos de maneira equivocada e, consequentemente, atrapalhar o processo de filtragem considerando os valores de produtividade e os vizinhos mais próximos de cada ponto. O objetivo principal de uma abordagem como esta é melhorar a qualidade final dos mapas obtidos, proporcionando maior assertividade na utilização desses mapas em processos de tomada de decisão em agricultura de precisão. Os experimentos foram conduzidos considerando um conjunto de 130 mapas de produtividade de algodão de primeira safra, em duas safras distintas. Os resultados mostraram que a pré-filtragem considerando informações da trajetória da colhedora permite uma melhor eficácia do processo de filtragem executado diretamente na variável de produtividade.

Palavras-chaves: colheitadeira; qualidade de mapas; tomada de decisão.

ABSTRACT

This work proposes an approach for filtering yield maps for cotton crop, thereby considering the inclusion of a pre-processing step based on data related to the harvester's trajectory, excluding incorrectly obtained data that may have been obtained in a wrong way and, consequently, hinderingdisrupt the filtering process considering the productivitythroughput values and the nearest neighbors of each point. The main goal of an approach like this is to improve the final quality of the maps obtained, providing greater assertiveness in the use of these maps in decision-making processes in precision agriculture. The experiments were conducted considering a set of 130 first-crop cotton yield maps, in two different seasons. The results showed that pre-filtering considering information from the harvester's trajectory allows for better efficiency of the filtering process carried out directly on the yield attribute.

Keywords: harvester; map quality; decision making.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000005

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

Dentre os diferentes tipos de dados disponibilizados por sensores proximais e remotos que podem ser utilizados em agricultura de precisão, os mapas de rendimento ou produtividade da cultura, obtidos ao longo dos anos a partir de sistemas de mapeamento instalados nas colheitadeiras, se destacam por serem indicativos de grande parte da variabilidade espacial presente na lavoura (Maldaner et al., 2019) e também por indicarem pontos de interesse para investigação e diagnóstico de fatores limitantes ou potencializadores da produtividade. Esses sistemas são compostos por monitores e processadores conectados a um receptor GNSS[1] para medição de posicionamento e velocidade, sensores de fluxo de massa, sensor de umidade e sensor de seção da plataforma, possibilitando a obtenção de mapas de produtividade com alta densidade de pontos.

Apesar de a evolução do sistema de mapeamento ter acontecido de maneira rápida ao longo dos anos no mercado, tanto no que diz respeito aos sensores, quanto aos softwares de comunicação e operação, a qualidade das informações coletadas ainda depende da calibração manual dos sensores. Caso a calibração dos sensores não seja realizada de forma adequada, podem ser gerados mapas com erros inerentes ao processo, que, no entanto, podem ser corrigidos a partir de técnicas de pós-processamento.

A literatura apresenta um vasto levantamento de erros que podem ocorrer nesse processo e prejudicar a obtenção dos mapas, como: erros nas coordenadas coletadas; mudanças de velocidade durante o trajeto; desconhecimento da largura de plataforma do equipamento; dados inválidos coletados em manobras de cabeceira; utilização de muitas colheitadeiras em um mesmo talhão com calibragens distintas, dentre outros (Sudduth; Drummond, 2007). Adicionalmente, diversas soluções baseadas em técnicas de pós-processamento têm sido apresentadas ao longo desse período para tentar resolver, ou ao menos amenizar, os erros proporcionados por esse processo de mapeamento e melhorar a qualidade dos mapas. Uma das primeiras iniciativas, o software Yield Editor, foi desenvolvida por Sudduth e Drummond (2007) com o objetivo de eliminar diversos tipos de erros obtidos em mapas de produtividade. Porém, requer um conhecimento avançado do usuário, pois necessita de análises visuais e determinação de diversos parâmetros para o seu correto funcionamento, o que torna o processo extremamente moroso. Seguindo essa mesma linha, Maldaner et al. (2018) desenvolveram o software MapFilter. Criado inicialmente para filtragem de mapas de produtividade, o MapFilter pode realizar esse pré-processamento em qualquer conjunto de dados com alta densidade de pontos, pois se utiliza de metodologias gerais de geoestatística para realizar o processo. Nesse caso, o usuário, além dos dados em forma de mapa, fornece informações relacionadas à filtragem geral, como a variação dos limites; e informações relacionadas à filtragem local, como a distância para dependência espacial. O algoritmo utilizado pelo MapFilter procura reduzir o coeficiente de variação (CV) dos dados presentes no mapa para um valor ótimo. Assim, apesar de ser uma solução bem mais simples que o YieldEditor, o MapFilter também exige certo conhecimento estatístico por parte do usuário.

Com o objetivo de facilitar o trabalho de filtragem, permitindo a análise automatizada de mapas de produtividade, Vega et al. (2019) desenvolveram um novo protocolo para esse processo. Os autores utilizaram em sua solução o índice de Moran (Li et al., 2007) para identificar a autocorrelação espacial e *outliers* locais e globais presentes nas amostras. Essa metodologia proporciona resultados similares aos obtidos pelo MapFilter, porém possibilita a execução da filtragem em vários mapas ao mesmo tempo, por meio do uso de computação paralela. Nos experimentos realizados, essa solução reduziu, em média, 30% do tamanho do conjunto de dados removendo esses supostos erros. O principal parâmetro a ser determinado por essa solução é a distância a ser considerada para a dependência espacial entre as amostras que, por muitas vezes, depende de conhecimento do usuário com relação ao conjunto de dados que possui.

Apesar da eficiência demonstrada por essas soluções, é possível que, dependendo dos parâmetros informados, sejam excluídos alguns pontos que deveriam ser mantidos nos conjuntos de dados, e mantidos alguns pontos que deveriam ser excluídos. Isso pode acontecer devido à utilização apenas dos valores de produtividade em si e de sua localização para o processo de filtragem. Porém, esses dados são apenas uma pequena parte das informações que um monitor de colheita pode fornecer. Neste trabalho, é proposta uma abordagem de filtragem em que é incrementada uma etapa de pré-processamento ao processo de filtragem desenvolvido por Vega et al. (2019), com o intuito de eliminar pontos que estão fora da trajetória que se espera da colheitadeira e que poderiam prejudicar a análise posterior utilizando métodos estatísticos. Para tanto, foram utilizadas frequências identificadas nos dados referentes ao ângulo da colheitadeira durante a execução da colheita. O pré-

[1] GNSS: do inglês Global Navigation Satellite System, ou Sistema Global de Navegação por Satélite.

-processamento utilizando apenas esse campo (ângulo da colheitadeira) ocorreu devido aos seguintes motivos: disponibilidade dessa informação nos mapas utilizados nos experimentos; em talhões relativamente planos e com linhas de plantio regulares, como na cultura do algodão, é esperado que a colheitadeira opere em apenas duas direções, fazendo com que a maior parte dos pontos coletados corresponda a duas faixas angulares muito bem definidas, com diferença de 180 graus entre elas; o objetivo principal do trabalho, que é mostrar que dados obtidos pelos monitores de colheita que não a produtividade em si também podem ser úteis para a filtragem e obtenção de mapas com melhor qualidade.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos para este trabalho foram realizados a partir de 130 mapas contendo dados brutos (sem tratamento) de produtividade do algodão de primeira safra, referente às safras 2018/2019 e 2020/2021, fornecidos pela Fazenda São Francisco, localizada em Riachão das Neves, BA, coordenadas centrais O 45º 47' 44.805'' e S 11º 40' 31.117'' (Figura 1).

Esses mapas possuem os dados brutos coletados, ou seja, sem uma normalização pelo peso real aferido em cada talhão, o que pode proporcionar o aparecimento de valores muito acima ou abaixo da média real aferida. Para este trabalho, não foi considerada a quantidade de colheitadeiras utilizada durante a colheita de cada um dos talhões e, portanto, é possível que algumas diferenças de produtividade encontradas nos mapas sejam devam-se a processos de calibração distintos dos sensores utilizados.

Os algoritmos utilizados para este experimento foram desenvolvidos usando a linguagem R (R-Project, 2022). Para a pré-filtragem proposta, considerando o ângulo da colheitadeira, foi proposto novo algoritmo considerando frequências de valores obtidas por meio de histograma. O único parâmetro a ser informado nesse algoritmo é o percentual mínimo exigido com relação à frequência máxima obtida por um intervalo do histograma, para que os dados referentes ao ângulo da colheitadeira sejam considerados válidos. Assim, se a maior frequência obtida por um intervalo for 100, e o usuário considerar um percentual mínimo de 40%, serão eliminados todos os pontos presentes no conjunto de dados que estejam em intervalos do histograma com frequência menor do que 40. Esse processo é realizado de maneira recursiva, com recálculo do histograma, até que não existam mais intervalos com frequência abaixo do percentual definido pelo usuário. Essa metodologia tem o objetivo de eliminar dados que foram gerados, por exemplo, por manobras de cabeceira e ao longo do percurso dentro do talhão, paradas para descanso, dentre outras, onde o operador deveria ter desligado o sensor para que os dados não fossem gerados. A Figura 2 exibe um exemplo do processo de pré-filtragem proposto, executado em um dos mapas utilizados neste trabalho.

Na Figura 2a já é possível observar dois intervalos de ângulos que ocorrem com muito maior frequência do que os outros (pelo menos 11) durante a operação da colheitadeira – entre 0 e 10 graus e entre 180 e 200

Figura 1. Localização do Experimento. Fonte da Imagem: Google Maps.

graus. Esses dois intervalos indicam praticamente a mesma angulação da colheitadeira, só que em sentidos opostos quando esta percorre o talhão. Na primeira iteração, após a eliminação dos 11 intervalos com frequência mais baixa, o histograma é recalculado e surgem dois novos pequenos intervalos, que podem ser considerados como subintervalos dos dois intervalos mais frequentes (Figura 2b). Finalmente, na última iteração, por terem frequência muito baixa, esses dois intervalos são eliminados, restando apenas os intervalos de maior frequência (Figura 2c). A partir desse resultado, é pressuposto que foram eliminados os pontos considerados como fora do trajeto usual da colheitadeira e que podem prejudicar análises posteriores.

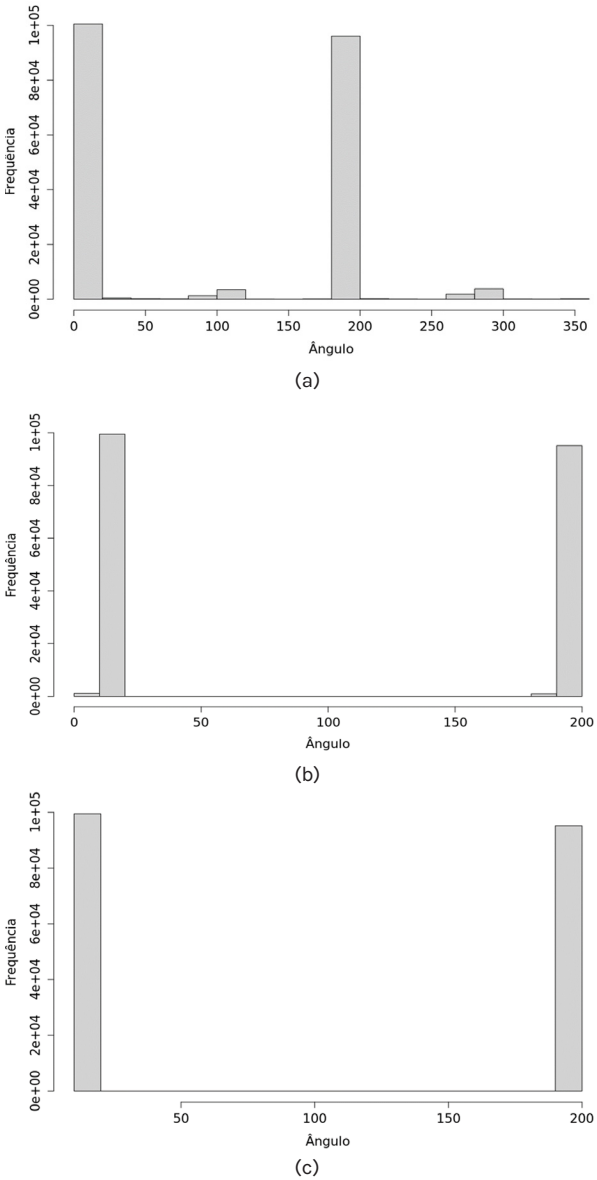


Figura 2. Exemplo de processo de pré-filtragem de amostras considerando a frequência de ocorrência de diferentes ângulos de operação da colheitadeira, com recálculo recursivo de (a) até (c).

Para o processo de filtragem dos dados de produtividade após a pré-filtragem, o protocolo desenvolvido por Vega et al. (2019) foi utilizado, considerando algumas adaptações. O código-fonte do algoritmo que processa o protocolo, escrito em linguagem R, está disponível na seção de materiais suplementares da publicação original. As principais modificações realizadas estão relacionadas ao desempenho do algoritmo na execução de funções que calculam distâncias entre os pontos vizinhos, pois os exemplos utilizados pelos autores são de talhões de produção de algodão com cerca de 35 ha, com espaçamento irregular entre linhas partindo de 7 m até 30 m, e espaço entre os pontos na linha de aproximadamente 3 m. Os talhões utilizados neste experimento possuem cerca de 200 ha, com espaçamento entre linhas regular de aproximadamente 4 m e distância entre os pontos na linha de aproximadamente 2 m. Assim, o conjunto de dados utilizado neste experimento é substancialmente mais denso do que o que foi utilizado por Vega et al. (2019) para testar o protocolo desenvolvido.

Por causa dessa diferença de densidade, as modificações foram realizadas essencialmente na questão da eficiência da função *dnearneigh* do pacote *spdep* (Bivand, 2022) utilizado pelo algoritmo desenvolvido por Vega et al. (2019) para buscar os vizinhos mais próximos de cada amostra, considerando uma distância definida como parâmetro pelo usuário. O valor a ser atribuído a esse parâmetro depende da densidade de pontos dos mapas a serem analisados, e deve ser definido de forma que cada ponto a ser filtrado possua uma quantidade de vizinhos suficiente para análise. Originalmente, essa função faz uma busca sequencial pelos vizinhos e foi alterada para utilizar uma estrutura computacional conhecida como *kd-tree* (Bentley, 1975), extremamente eficiente para busca de vizinhos mais próximos, permitindo a filtragem dos 130 mapas pelo atributo de produtividade em um tempo aceitável. Essas alterações foram realizadas diretamente pelos desenvolvedores responsáveis por esse pacote. Assim, o protocolo proposto neste trabalho permitiu analisarmos a redução do coeficiente de variação de cada mapa original de produtividade, considerando três abordagens distintas: I) filtragem apenas pelo atributo de produtividade, como originalmente proposto por Vega et al. (2019); II) filtragem apenas pelo ângulo da colheitadeira a partir da eliminação de amostras com valores menos frequentes no histograma; e III) filtragem considerando a abordagem (II) (como uma pré-filtragem) e seus mapas de saída como entrada para execução da abordagem (I).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a execução da filtragem dos 130 mapas de produtividade utilizando as três abordagens descritas na seção anterior, foi realizado o cálculo do coeficiente de variação resultante para cada um dos mapas originais, bem como para os mapas obtidos usando essas três abordagens (Figura 3).

Por meio do gráfico da Figura 3, é possível verificar que, na maioria dos casos, a utilização de metodologias de filtragem de mapas de produtividade pode reduzir substancialmente o coeficiente de variação desses mapas. Em média, a abordagem (I) proporcionou uma redução de aproximadamente 25%; a abordagem (II), uma redução de aproximadamente 3%; e a abordagem (III), uma redução de aproximadamente 24%. A abordagem (II), por si só, representa uma redução pequena, porém que pode ser importante para evitar reduções mais drásticas que podem ocorrer com o uso exclusivo da filtragem por valores de produtividade, considerado na abordagem (I).

Uma outra forma de verificar o efeito das três diferentes abordagens de filtragem é constatando a porcentagem de redução de amostras contendo dados supostamente espúrios com relação ao conjunto de dados original (Figura 4).

Por meio do gráfico da Figura 4, também é possível verificar que, além do CV, abordagens de filtragem também podem reduzir substancialmente a quantidade de amostras dos mapas, considerando que as amostras eliminadas são supostamente espúrias. Em média, a abordagem (I) proporcionou uma redução de 17,1% na quantidade de amostras; a abordagem (II) proporcionou uma redução de 1,9% na quantidade de amostras; e a abordagem (III), uma redução

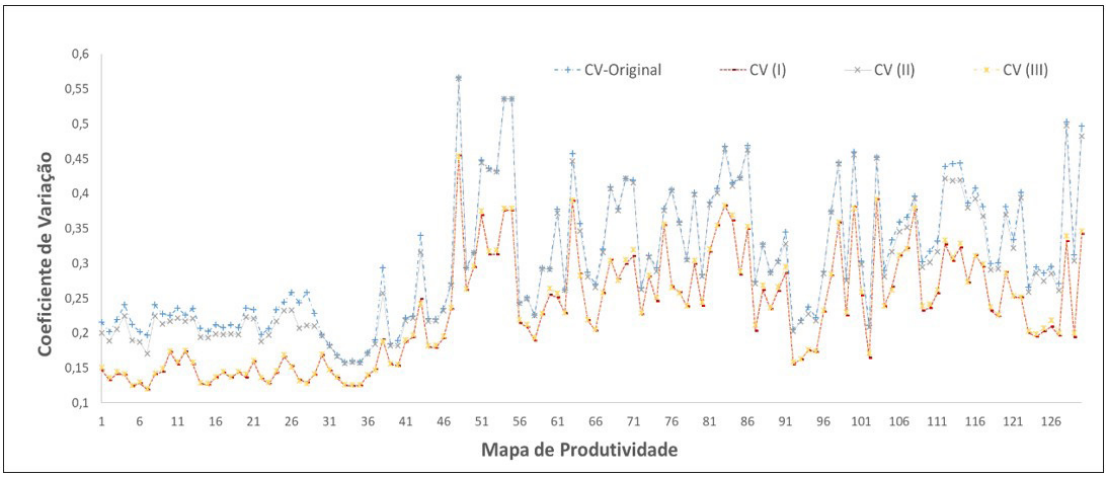


Figura 3. Gráfico exibindo os coeficientes de variação (CV) calculados para os 130 mapas de produtividade utilizados no experimento (numerados sequencialmente no eixo X), considerando os dados originais e as abordagens de filtragem (I), (II) e (III).

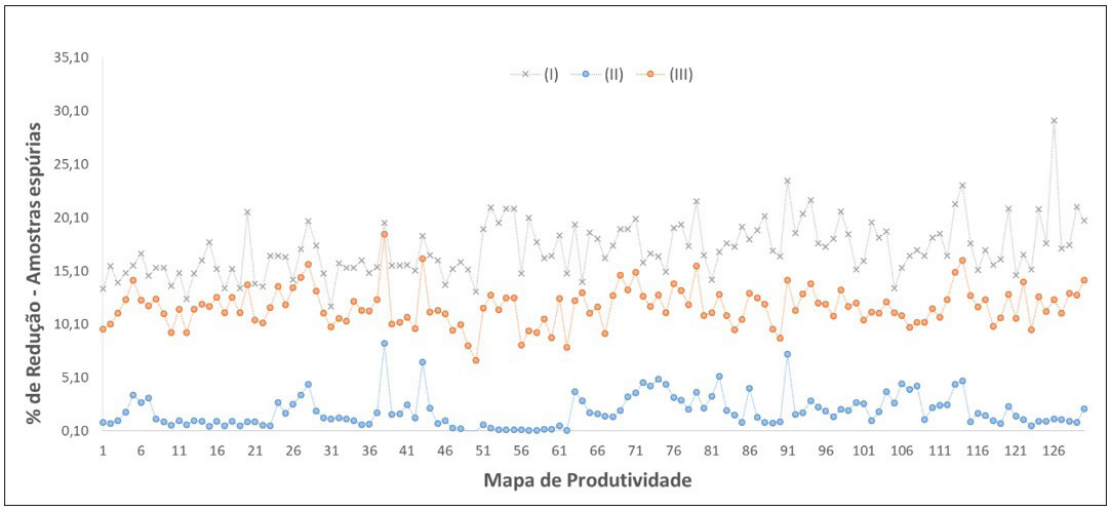


Figura 4. Gráfico que exibe a redução da quantidade de amostras (em %) em relação ao conjunto de dados original, considerando as três abordagens de filtragem utilizadas (eixo Y) para cada um dos mapas utilizados (numerados sequencialmente no eixo X).

de 11,7% na quantidade de amostras. Reduções substanciais da quantidade de amostras, desde que estas sejam realmente espúrias, podem proporcionar ganhos de eficiência e eficácia em atividades futuras a serem realizadas com esses mapas, como a interpolação espacial e o delineamento de zonas de manejo.

A Figura 5 mostra exemplos de mapas resultantes considerando as três abordagens para um dos talhões da safra 2019/2020, com cerca de 196 ha de área, onde o uso da pré-filtragem pelo ângulo de operação da colheitadeira se mostrou importante para eliminar pontos que podem prejudicar uma filtragem com base em vizinhos mais próximos.

Por meio da Figura 5 (itens a e c), é possível verificar o viés da abordagem (II) em eliminar apenas os pontos que estão fora da trajetória usual da colheitadeira, como pode ser verificado observando-se a linha em tom essencialmente vermelho (valores de produtividade próximos ou iguais a zero). A Figura 5b mostra o mapa filtrado utilizando-se exclusivamente os dados de produtividade, e uma redução de cerca de 50% no coeficiente de variação (CV) e 19,8% da quantidade de amostras do mapa. Essa redução no CV é praticamente a mesma que ocorre ao utilizar a abordagem (III), mas com uma redução de amostras menor, de cerca de 15,7% (Figura 3d). Nesse caso, é possível observar que a pré-filtragem inicial evitou que alguns dados fossem eliminados do mapa final diretamente pela filtragem de produtividade (cerca de 4% das amostras), como os dois "buracos" gerados ao longo da linha eliminada por trajetória inválida que aparecem no resultado do mapa da Figura 5b e não aparecem no mapa da Figura 5d. A Figura 6 mostra mais detalhes de duas regiões do mapa da Figura 5d onde é possível verificar esse efeito.

A Figura 7 mostra outro exemplo similar ao exibido na Figura 5, também para um talhão da safra 2019/2020 com aproximadamente 195 ha de área, onde é possível verificar a influência da pré-filtragem proposta pela abordagem (III).

Da mesma forma que ocorre no exemplo anterior, a filtragem utilizando apenas dados de produtividade (Figura 7b) proporciona uma alta redução no coeficiente de variação do mapa resultante (cerca de 45%) e o aparecimento de muitos "buracos" que poderiam conter manchas indicativas de algo relacionado à variabilidade da área. Nesse exemplo também é possível observar, comparando-se as Figuras 7a e 7c, que a abordagem (II) novamente proporcionou apenas a retirada dos pontos fora da trajetória da colheitadei-

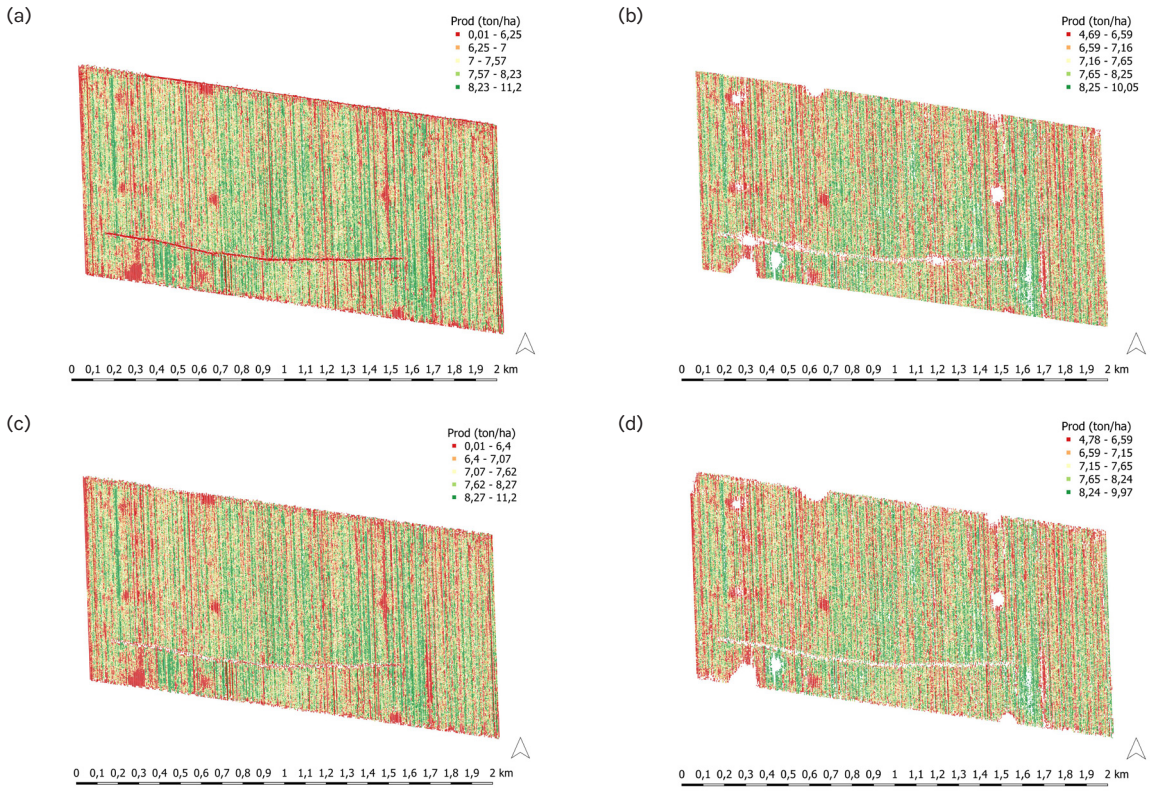


Figura 5. Exemplo do processo de filtragem de mapa de produtividade, onde: (a) mapa com dados brutos originais (CV=0,26); (b) mapa filtrado considerando a abordagem (I) (CV=0,13 e redução de 19,8% das amostras); (c) mapa filtrado considerando a abordagem (II) (CV=0,21 e redução de 4,45% das amostras); e (d) mapa filtrado considerando a abordagem (III) (CV=0,13 e redução de 15,7% das amostras). As cores representam valores de produtividade entre 0 e 11 ton/ha, na escala Vermelho-Amarelo-Verde (RdYlGn).

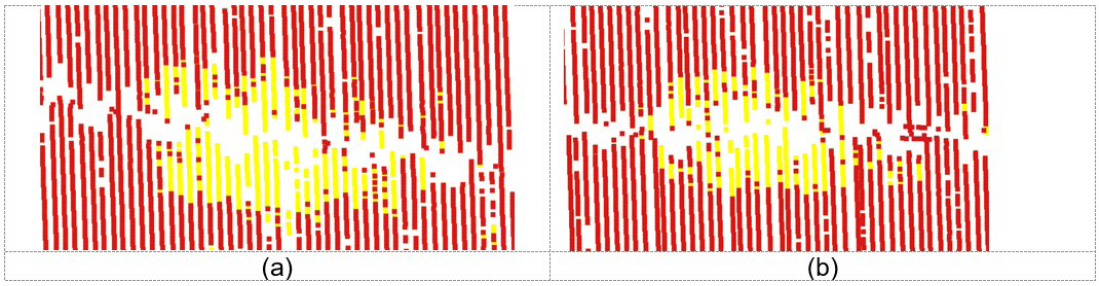


Figura 6. Detalhes de duas regiões do mapa da Figura 5d onde se observam pontos que foram mantidos em virtude execução do pré-processamento pelo ângulo da colheitadeira (em amarelo) na abordagem (III) em comparação com os que seriam mantidos com a utilização direta da filtragem por produtividade realizada pela abordagem (I) (em vermelho).

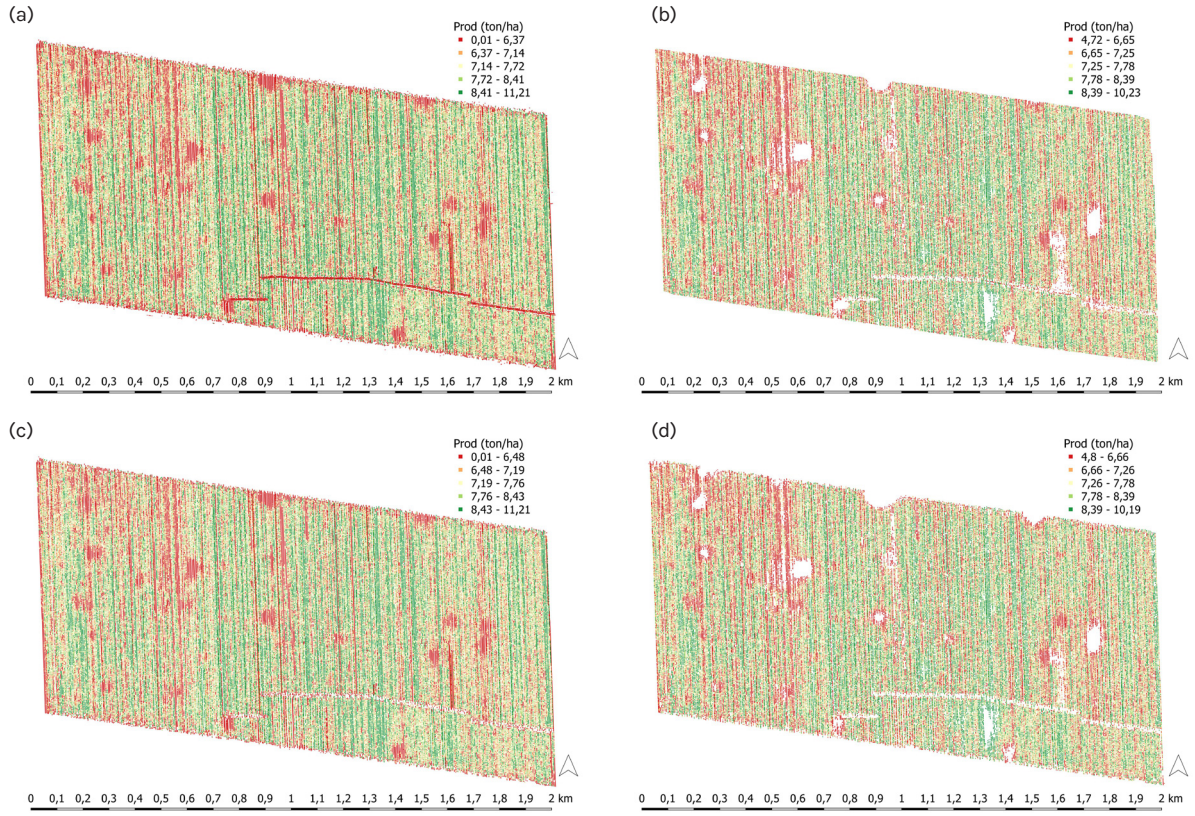


Figura 7. Exemplo do processo de filtragem de mapa de produtividade, onde: (a) mapa com dados brutos originais (CV=0,24); (b) mapa filtrado considerando a abordagem (I) (CV=0,13 e redução de 17,13% das amostras); (c) mapa filtrado considerando a abordagem (II) (CV=0,21 e redução de 3,42% das amostras); e (d) mapa filtrado considerando a abordagem (III) (CV=0,13 e redução de 14,48% das amostras). As cores representam valores de produtividade entre 0 e 11 ton/ha, na escala Vermelho-Amarelo-Verde (RdYlGn).

ra, ocasionando também uma redução na dimensão dos "buracos" proporcionados pela abordagem (I) quando utilizada como pré-filtragem na abordagem (III) (Figura 7d).

O último exemplo mostra os processos executados em dados coletados de um talhão na safra 2021/2022, com aproximadamente 194 ha de área com um CV=0,21 e, portanto, já mais baixo em relação aos anteriores para o mapa original (Figura 8).

Nesse exemplo, apesar de a abordagem (I) proporcionar uma redução menor no coeficiente de variação com relação aos exemplos anteriores (cerca de 22%), é possível observar a eliminação de pontos importantes do mapa, no canto inferior direito do talhão, que podem representar uma mancha de produtividade baixa de fato (Figuras 8a e 8b). O efeito causado pela abordagem (II) não é perceptível com relação ao mapa original (Figura 8c), porém a sua utilização como pré-processamento para a abordagem (III) mostra uma tendência de evitar alguns pontos eliminados pela abordagem (I), também no canto inferior direito do talhão, que proporcionaram a formação de buracos menores com relação aos que foram gerados pela abordagem (I) (Figura 8d). Essa tendência também pode ser observada pela quantidade de amostras eliminadas pela abordagem (III): cerca de metade

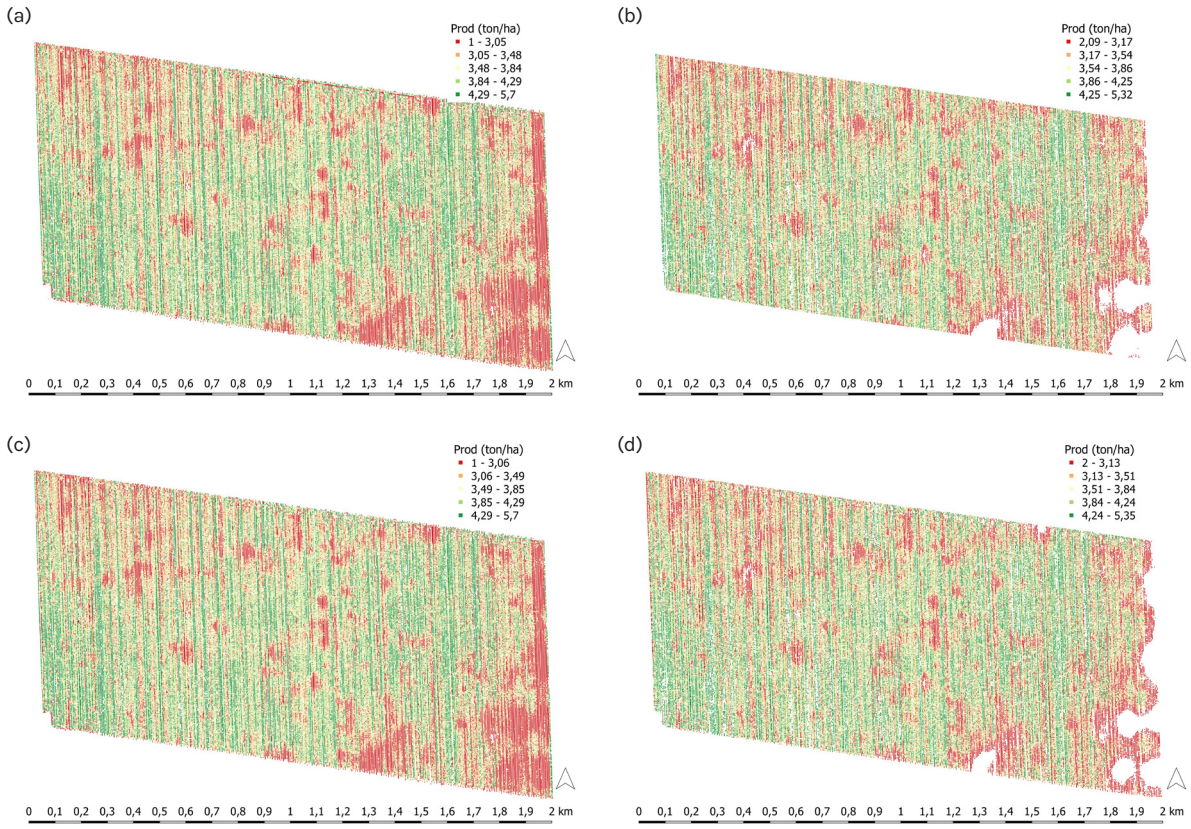


Figura 8. Exemplo do processo de filtragem de mapa de produtividade, onde: (a) mapa com dados brutos originais (CV=0,21); (b) mapa filtrado considerando a abordagem (I) (CV=0,16 e redução de 19,7% das amostras); (c) mapa filtrado considerando a abordagem (II) (CV=0,20 e redução de 1,1% das amostras); e (d) mapa filtrado considerando a abordagem (III) (CV=0,17 e redução de 11,2% das amostras). As cores representam valores de produtividade entre 0 e 11 ton/ha, na escala Vermelho-Amarelo-Verde (RdYlGn).

da quantidade que foi eliminada pela abordagem (I). De qualquer forma, apesar de uma melhora no mapa, os buracos ainda permanecem, o que dá a entender que, especificamente para mapas com manchas muito evidentes de baixas produtividades, é necessário um ajuste no parâmetro de distância dos vizinhos mais próximos para a função *dnearneigh*, utilizada tanto pela abordagem (I) quanto pela abordagem (III).

Considerando os três exemplos descritos, a utilização de pré-processamento nos mapas de colheita, eliminando dados que podem ter sido causados por erros operacionais ou por trajetórias indesejáveis das colheitadeiras antes de realizar o tratamento estatístico diretamente na variável de produtividade, mostrou-se promissora no sentido de evitar ajustes indevidos e, consequentemente, a eliminação de amostras representativas para a variabilidade espacial da lavoura. Assim, é importante que esse passo seja realizado quando esse tipo de dado está disponível. Entretanto, com a pré-filtragem eliminando apenas os pontos cujo ângulo da colheitadeira não está entre os mais frequentes, ainda não é possível afirmar que a permanência do CV alto em alguns mapas, mesmo após a execução desse pré-processamento, ocorre apenas devido à variabilidade da produtividade. Assim, outras variáveis já destacadas, relacionadas à trajetória da colheitadeira e à própria operação de campo, devem ser avaliadas para que sejam obtidos resultados mais assertivos.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um experimento para filtragem de mapas de produtividade, considerando três abordagens distintas, utilizando apenas o dado de produtividade em si; apenas dados referentes ao ângulo de operação da colheitadeira (trajetória); e uma combinação das duas anteriores.

A abordagem de Vega et al. (2019) mostrou bom desempenho na redução do coeficiente de variação e a facilidade de execução em lote, uma vez que seu código-fonte foi preparado para operar dessa maneira. Entretanto, os exemplos utilizados pelos autores eram de mapas com densidade de pontos muito menor do que os mapas gerados para este experimento, o que demandou alterações no código-fonte para melhorar o desempenho dos algoritmos utilizados. Além disso, para os exemplos deste trabalho, essa aborda-

gem proporcionou a formação de "buracos" na maioria dos mapas resultantes, eliminando pontos que provavelmente deveriam continuar fazendo parte do mapa. Esses "buracos" podem aparecer tanto pela dificuldade em se determinar os parâmetros de distância para a dependência espacial, exigidos pelo algoritmo para os usuários, como também pela presença, nesses locais, de dados coletados indevidamente por erros operacionais ou manobras indesejadas realizadas pela colheitadeira.

Para tentar diminuir o efeito desses problemas, este trabalho propôs uma abordagem em que os dados referentes a erros operacionais pudessem ser eliminados antes da análise geoestatística dos dados de produtividade. Os resultados mostraram que a pré-filtragem eliminando amostras com ângulos de colheitadeira menos frequentes, ou seja, fora da direção convencional da colheita, permitem uma melhor eficácia do processo de filtragem executado diretamente na variável de produtividade.

Para melhorias nessa nova abordagem, é importante investigar a possibilidade de utilização de outras variáveis referentes à operação fornecidas pela colheitadeira, como as variações de distância e intervalos de tempo entre os pontos coletados. Uma outra possibilidade é utilizar abordagens de estimativa de produtividade considerando dados de sensoriamento remoto, como a desenvolvida por Morelli-Ferreira et al. (2021), para realizar uma pré-filtragem e eliminar pontos com valores inconscientes na resolução espacial obtida pelo satélite utilizado.

AGRADECIMENTOS

À Fazenda São Francisco, pelo fornecimento dos mapas de produtividade referentes a duas safras.

REFERÊNCIAS

BENTLEY, J. L. Multidimensional binary search trees used for associative searching. **Communications of the ACM**, v. 18, n. 9, p. 509-517, 1975. DOI: http://doi.org/10.1145/361002.361007.

BIVAND, R. R Packages for analyzing spatial data: a comparative case study with areal data. **Geographical Analysis**, v. 54, n. 3, p. 488-518, 2022. DOI: http://doi.org/10.1111/gean.12319.

LI, H.; CALDER, C. A.; CRESSIE, N. Beyond Moran's I: testing for spatial dependence based on the spatial autoregressive model. **Geographical Analysis**, v. 39, n. 4, p. 357-375, 2007. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1538-4632.2007.00708.x.

MALDANER, L. F.; CORRÊDO, L. P.; TAVARES, T. R.; MENDEZ, L. G.; DUARTE, C.; MOLIN, J. P. Identifying and filtering out outliers in spatial datasets. In: **Proceedings of the 14th International Conference on Precision Agriculture**, Montreal: ISPA, 2018. p. 24-27.

MALDANER, L. F.; WEI, M. C. F.; MOLIN, J. P. **Mapas de produtividade**. Agricultura de Precisão – Boletim Técnico 04. Piracicaba: ESALQ-USP, 2019.

MORELLI-FERREIRA, F. MAIA, N. J. C.; TEDESCO, D.; KAZAMA, E. H.; CARNEIRO, F. M.; SANTOS, L. B.; SEBEN JUNIOR, G. F.; ROLIM, G. S.; SHIRATSUCHI, L. S.; SILVA, R. P. Comparison of machine learning techniques in cotton yield prediction using satellite remote sensing. **Preprints**, v. 2021120138, 2021. DOI: http://doi.org/10.20944/preprints202112.0138.v2.

R-PROJECT, 2022. Disponível em: https://www.r-project.org/. Acesso em: 08 ago. 2022.

SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, ST. Yield editor: Software for removing errors from crop yield maps. **Agronomy Journal**, v. 99, n. 6, p. 1471-1482, 2007.

VEGA, A.; CÓRDOBA, M.; CASTRO-FRANCO, M.; BALZARINI, M. Protocol for automating error removal from yield maps. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 5, p. 1030-1044, 2019. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-018-09632-8.

Utilização de NDVI para delimitação de Zonas de Manejo e ajuste na população de plantas

38

Use of NDVI for delimitation of Differentiated Management Units and adjustment in the plant population

Antônio Luis Santi[1], João Pedro Cunha Arruda[2], Ezequiel Zibetti Fornari[3], Caroline Montanari Giraldi[4], Luís Felipe Rossetto Gerlach[5], Luiz Henrique Baptista Velho[6], Maurício Guilherme Stein Vian[7], Aline Linhares do Amaral[8]

[1] *Professor Doutor, Departamento de Ciências Agronômicas e Ambientais, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), Brasil, santi_pratica@yahoo.com.br*

[2] *Acadêmico, Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), Brasil, joao.cunha@acad.ufsm.br*

[3] *Acadêmico, Pós-Graduação em Agronomia - Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), Brasil, ezequiel.fornari@yahoo.com.br*

[4] *Acadêmico, Pós-Graduação em Agronomia - Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), Brasil, carolinegiraldi@hotmail.com*

[5] *Acadêmico, Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), lfelipeross@hotmail.com*

[6] *Acadêmico, Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), Brasil, luiz.velho@acad.ufsm.br*

[7] *Acadêmico, Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), Brasil, aline.linhares@acad.ufsm.br*

[8] *Acadêmico, Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Frederico Westphalen (RS), Brasil, mauricio.vian@acad.ufsm.br*

RESUMO

O aumento da demanda global por alimentos é um grande desafio para a agricultura moderna e sustentável. Frente a esse cenário, a Agricultura de Precisão (AP) assume papel de protagonista, uma vez que é tida como um conjunto de tecnologias que visa ao aumento da eficiência agronômica de produção com base no manejo diferenciado de áreas agrícolas. Reconhecer o potencial produtivo dos ambientes intralote no campo produtivo, otimizando o gerenciamento agronômico mais conveniente para cada caso, é um determinante no sucesso das atividades agrícolas modernas. Este trabalho teve por objetivo avaliar a utilização de imagens de satélites por meio do sensoriamento remoto na leitura dos índices de vegetação – NDVI para caracterização de ambientes com diferentes potenciais produtivos, denominados zonas de manejo (ZMs), e sua relação com a performance das culturas no campo. Foi estudado um talhão comercial de 106,94 hectares, que vem sendo manejado em sistema de plantio direto desde 2008. Durante o trabalho, foi obtido o histórico de imageamento de NDVI dos últimos sete anos, totalizando 16 mapas de ambientes e, destes, foram selecionados quatro para posterior criação do mapa temático de NDVI, o qual originou mapa temático de ZMs caracterizadas por ambientes de baixo, médio e alto potenciais produtivos. As ZMs foram utilizadas para prescrição de taxa variável de sementes e criação do mapa temático de semeadura de milho (*Zea mays*). Por fim, utilizaram-se mapas de rendimento de grãos das culturas de milho e soja (*Glycine max*) da área estudada para correlacionar visualmente e, por meio da correlação de Pearson, verificar sua relação com as ZMs. Os resultados mostraram-se relevantes e eficientes na utilização de NDVI para delimitação e criação de ZMs, e demonstraram estar correlacionados com a variabilidade produtiva dos grãos.

Palavras-chave: agricultura de precisão; índice de vegetação; NDVI; ZMs.

ABSTRACT

The increase in global demand for food is a major challenge for modern and sustainable agriculture. Faced with this scenario, Precision Agriculture (PA) assumes a leading role, since it is seen as a set of technologies that aim to

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000017

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

increase the agronomic efficiency of production based on the differentiated management of agricultural areas. Recognizing the productive potential of intra-lot environments in the productive field and optimizing the most convenient agronomic management for each case, is a determining factor in the success of modern agricultural activities. This study aimed to evaluate the use of satellite images through remote sensing in the reading of vegetation indices - NDVI to characterize environments with different productive potentials, called differentiated management units (UGDs), and their relationship with crop performance. in the field. A commercial plot of 106.94 hectares was studied, which has been managed in a no-tillage system since 2008. During the work, the history of NDVI imaging over the last seven years was obtained, totaling sixteen maps of environments, and selected four for later creation of the NDVI thematic map, which originated the thematic map of UGDs characterized by low, medium, and high productive potential environments. The UGDs were used to prescribe variable seed rates and to create the thematic map of maize (Zea mays) sowing. Finally, corn and soybean yield maps (Glycine max) of the studied area were used to visually correlate and through Pearson's correlation their relationship with the UGDs. The results showed to be relevant and efficient in the use of NDVI for delimitation and creation of UGDs and they were shown to be correlated in the productive variability of the grains.

Keywords: precision agriculture; vegetation indices; NDVI; UGDs.

1 INTRODUÇÃO

A variabilidade espacial das glebas é evidenciada na produção das lavouras e são difíceis de serem homogeneizadas; eis que surge então o conceito de Unidades de Manejo (Molin, 2001) ou Zonas de Manejo (ZMs) (Rodrigues; Zimback 2002), as quais são definidas como regiões dentro dos campos de produção que apresentam mínima variabilidade espacial e mostram-se permanentes ao longo do tempo. Ainda os mesmos autores definem Zona de Manejo (ZM) como sendo áreas delimitadas, dentro de um talhão, com mínima variabilidade interna.

Segundo Rodrigues e Zimback (2002), os mapas de produtividade também são informações importantes que podem expressar a variabilidade espacial intrínseca da área e, portanto, serem utilizados na delimitação das unidades de manejo.

Para Rodrigues e Zimback (2002) e Bazzi (2012), uma vez demarcadas, as ZMs são uma alternativa para viabilizar a AP economicamente, funcionando como unidades de operação para aplicação localizada de insumos, taxa variada de sementes, indicador para amostragem do solo e da cultura, etc. Segundo Alba et al. (2012), a definição das ZMs é fundamental para adoção da AP, pois permite reduzir os custos das operações de campo e otimizar a gestão do empreendimento. Observe-se que as ZMs podem ser definidas por diversos métodos.

A utilização de sistema de sensoriamento remoto (SR) por meio de índices de vegetação, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), tem potencial para geração de informação e associação para geração de ZM, e, a partir disso, realizarem-se manejos diferenciados.

Acredita-se que, associando informações geradas pelos mapas de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), podem-se definir ZMs com distintos potenciais produtivos, que possibilitem realizar intervenções localizadas em taxa variável na população de plantas de acordo com a oferta do ambiente, de forma a garantir melhorias na produtividade e rentabilidade das lavouras.

Considerando isto, o objetivo do trabalho foi avaliar a utilização de imagens de satélites por meio do sensoriamento remoto na leitura dos índices de vegetação – NDVI – para caracterização de ambientes com diferentes potenciais produtivos e sua relação com a performance das culturas no campo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido em área comercial de produção de grãos pertencentes à Granja Raízes do Campo, de propriedade de Jovane Basso, situada na localidade de Entre Rios, no município de Capão do Cipó, Rio Grande do Sul, Brasil (Latitude 28°53'05"S, Longitude 54°30'38,20"O).

Pela classificação climática de Köppen-Geiger, o clima é considerado mesotérmico úmido sem estação seca. O solo presente no local de estudo é um Latossolo Vermelho Distroférrico, conforme classificação do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Embrapa, 2018).

A área destinada ao protocolo de avaliação possui 106,94 hectares, sendo manejada em sistema de plantio direto (SPD) desde 2008. Possui histórico de fertilidade desde 2012, por meio de mapas de fertilidade, os quais acumulam manejos de fertilização à taxa variável nos últimos cinco anos. Foram utilizados, para elaboração do trabalho, dados históricos da área, conforme descrito na Tabela 1.

Analisaram-se sete imagens obtidas por meio do satélite Landsat 8, com resolução espacial de 30 × 30 m, no período de 2014 a 2017. Destas, selecionaram-se três (Tabela 2), que obtiveram melhor qualidade, para sua posterior sobreposição aos mapas temáticos

Tabela 1. Relação dos dados e imageamentos históricos utilizados.

Safra	Cultura	Cultivar	Semeadura	Colheita	Imageamento
2013/2014	Milho	30f53	Agosto/2013	Março/2014	16/11/2014
2014/2015	Soja	Nidera 5445	Outubro/2014	Março/2015	08/01/2015 19/12/2014
2015/2016	Milho	Dekalb 230	Agosto/2015	Março/2016	03/12/2015 22/11/2015
2016/2017	Milho	Agroceres 220	Agosto/2016	Janeiro/2017	26/02/2017 05/12/2016

Fonte: Banco de dados do produtor.

de NDVI e assim garantir maior confiabilidade nos mapas de ZM.

A classificação das imagens em ZM foi realizada pela GeoAgro por meio do *software* GeoAgroGIS com o uso do Índice de Vegetação com Diferença Normalizada (NDVI). Desta maneira, a área foi dividida em três classes, em tamanhos e localização diferentes representados pelos valores de NDVI denominados: baixo, médio e alto.

As classes que caracterizam os ambientes produtivos tiveram por parâmetro de classificação bandas de respostas espectrais ao IVs (índices de vegetação). Considerando as respostas espectrais de IVs obtidas pelas interpolações dos mapas de NDVI históricos, caracterizaram-se/delimitaram-se os ambientes produtivos descritos na Tabela 3.

Neste contexto, procurou-se diagnosticar e reconhecer, por meio de mapas de NDVI, dentro do talhão, ambientes que oferecem potenciais produtivos homogêneos, implementando e aferindo a gestão de manejo de prescrição de população de plantas mais conveniente para cada caso. Corroborando para tal levantamento, a empresa AgroPrecision forneceu dados de IVs históricos que caracterizaram ambientes com distintos potenciais produtivos, os quais tratamos como ZM no trabalho, classificando-os com base no mapa de NDVI (Figura 1).

Todas as leituras históricas do índice de vegetação NDVI foram georreferenciadas na mesma localização e no mesmo dimensionamento espacial do talhão e temporalmente em safras/datas distintas. Para interpolação, utilizou-se a ferramenta GeoAgroGIS, *software* de sistema de informação geográfica.

Diante desta exigência, para o presente trabalho foram utilizadas três densidades de semeadura de milho, sendo 80.000 sementes aptas/ha para ZM baixa, 83.000 sementes aptas/ha para ZM média e 86.000 sementes aptas/ha para ZM alta, objetivando manejo em sítio específico do insumo semente de milho, buscando maior rendimento de grãos. O mapa temático de taxa de semeadura seguiu protocolos de tecnologias estabelecidos e produzidos pela empresa AgroPrecision, a qual desenvolveu o trabalho.

Tabela 2. Relação das imagens de satélites selecionadas para delimitação de Zonas de Manejo (ZMs).

Safra	Cultura	Data da imagem	Satélite
2013/2014	Milho	16/11/2014	Landsat 8
2014/2015	Soja	08/01/2015	Landsat 8
2016/2017	Milho	05/12/2016	Landsat 8

Fonte: Banco de dados da empresa GeoAgro.

Tabela 3. Caracterização dos Ambientes Produtivos baixo, médio e alto.

Resposta espectral de IVs (classe)*	NDVI efetivo (classe)*	Ambiente Produtivo
< 0,6481	0,6481	Baixo
0,6481 a 0,6664	0,6664	Médio
0,6836 <	0,6836	Alto

IV: Índice de Vegetação; NDVI: Índice de Vegetação com Diferença Normalizada; *Os parâmetros de classes seguem protocolos definidos pela detentora das imagens; Fonte: GeoAgro.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do presente trabalho condizem com Brandão et al. (2014) em seu trabalho de correlação existente nas variações de biomassa (IVs) obtidas a partir de imagens aéreas de NDVI para criação de ZM, no qual os autores demonstraram que é possível criar ZM a partir de imagens do dossel (NDVI).

Em conformidade com a Figura 1, visualiza-se uma alta correlação no comparativo do mapa temático de NDVI com o mapa de rendimento de grãos de soja no ano agrícola de 2014/2015 e, concomitantemente, com o mapa de rendimento de grãos de milho no ano agrícola de 2015/2016, correspondendo este ín-

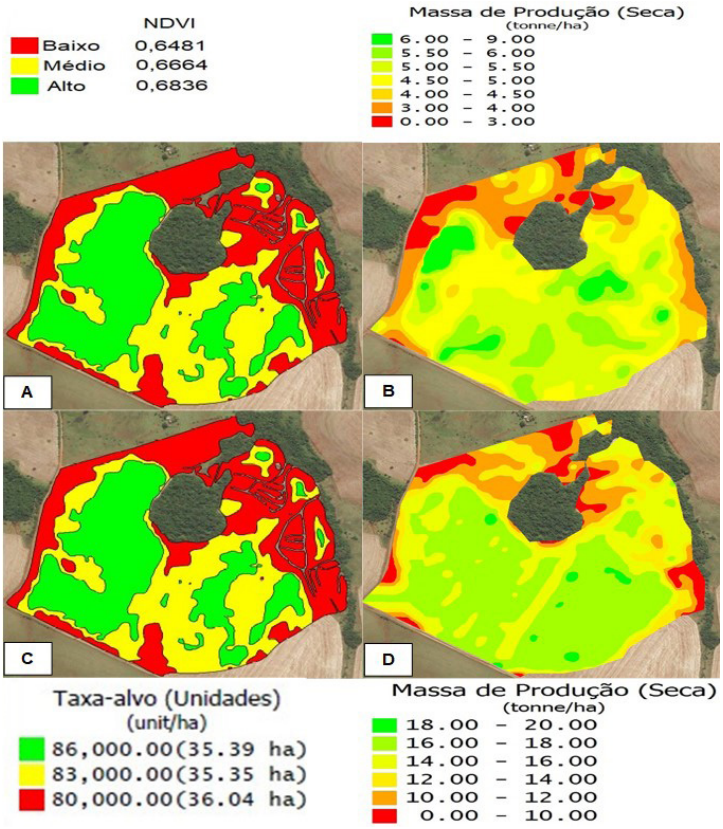


Figura 1. Mapa temático do histórico de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) da área agrícola de estudo (A); Mapa temático de rendimento de grãos de soja 2014/2015 (B); Mapa temático com densidades de semeadura de milho utilizadas nas diferentes ZMs na safra 2015/2016 (C); Mapa temático de rendimento de grãos de milho 2015/2016 (D). Fonte: Arquivo pessoal do produtor, interpolado pelo autor.

dice de vegetação como excelente fator para antecipar diferentes potenciais produtivos de milho no sistema agrícola.

Por via destes aspectos, evidencia-se uma conformidade entre o rendimento de grãos e NDVI, visto que regiões de baixo NDVI expressaram-se como regiões de baixo rendimento de grãos; regiões de médio NDVI correlacionaram-se com regiões de médio rendimento de grãos, e regiões de alto NDVI correlacionaram-se com regiões de alto rendimento de grãos de soja e milho.

Com esta relação direta da variabilidade espacial do rendimento de grãos de milho com os valores de NDVI e, consequentemente, com as ZMs, é possível a utilização dessa informação para ser uma ferramenta básica em recomendações de manejo, como a semeadura de milho com diferentes populações em função de ambientes diferenciados na área agrícola, tal qual pode ser verificado por Santi e Amado (2012), que concluíram que o ajuste da população de plantas, de acordo com a oferta específica de cada ambiente, otimizou rendimento de grãos.

Os resultados avaliados no trabalho corroboram com os de Araújo et al. (2005), no qual relatam que as imagens aéreas multiespectrais podem gerar relações significativas com os rendimentos de grãos, proporcionando informações importantes para o delineamento de zonas de manejo. De mesma forma, Martins (2017) evidenciou a eficiência da utilização do índice NDVI para geração de ZM, assim como do histórico de mapas de colheita. Além disso, Santi e Amado (2012) e Amado et al. (2014) citam que a utilização de mapas de colheita torna-se ferramenta-chave para a prospecção da variabilidade espacial do rendimento de grãos.

4 CONCLUSÕES

O uso de mapas temáticos de índices de vegetação – NDVI mostrou-se efetivo para delimitação e criação de Zonas de Manejo (ZMs).

O índice de vegetação NDVI teve alta correlação com o rendimento de grãos de milho, caracterizando diferentes potenciais de produção intralote.

A caracterização dos ambientes produtivos demonstrados por meio das ZMs se manteve ao longo dos anos estudados, sendo tal permanência demonstrada pelos mapas temáticos de NDVI e mapas de rendimento de grãos da soja e do milho.

A variação do rendimento de grãos da cultura do milho seguiu a tendência dos potenciais produtivos das ZMs.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa e às instituições parceiras.

REFERÊNCIAS

ALBA, J. F.; FLORES, C. A.; MIELE, A. Definição das zonas de manejo com base nas características do solo em viticultura de precisão: estudo de caso no Vale dos Vinhedos, Bento Gonçalves, RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 5., 2012., Ribeirão Preto. **Anais** [...]. Ribeirão Preto: SBEA, 2012. p. 1-6.

Amado, T. J. C.; Schwalbert, R. A.; Gebert, F. H.; Santi, A. L.; Tabaldi, F. Zonas de manejo: atributos de solo e planta visando a sua delimitação e aplicação na agricultura de precisão. **Revista Plantio Direto**, v. *23*, p. 21-32, 2014.

Araújo, J. C.; Vettorazzi, C. A.; Molin, J. P. Estimativa da produtividade e determinação de zonas de manejo, em culturas de grãos, por meio de videografia aérea multispectral. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. *27*, n. 3, p. 437-447, 2005. DOI: http://doi.org/10.4025/actasciagron.v27i3.1406.

Bazzi, C. L. Software para definição e avaliação de unidades de manejo em agricultura de precisão. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO*, 2012., Ribeirão Preto. **Anais** [...]. Ribeirão Preto: Embrapa, 2012.

BRANDÃO, Z. N.; OLIVEIRA, R. P.; SANA, R. S.; SOFIATTI, V.; ZONTA, J. H.; CUNHA MEDEIROS, J. Uso de imagens orbitais e suborbitais na caracterização da variabilidade espacial da produtividade. In: INAMASU, R.; BERNARDI, A. C. C. (Eds.). **Agricultura de precisão:** resultados de um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2014. p. 306-314.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

MARTINS, R. C. **Definição de zonas de manejo por índices de vegetação obtidos por sensoriamento remoto e mapas de produtividade**. 2017. 62 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

MOLIN, J. P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, v. *22*, p. 83-92, 2001.

RODRIGUES, J. B. T.; ZIMBACK, C. R. L. Delimitação de zonas de manejo através da análise e classificação de mapas de Produtividade de milho e soja. **Energia na Agricultura, Botucatu**, v. *17*, n. 1, p. 44-61, 2002.

Santi, A.; Amado, T. População de plantas de milho e oferta ambiental. **Revista a Granja**, v. *761*, p. 41-43, 2012.

39

Definição de zonas de manejo em área de produção de milho 2ª safra na região norte do Paraná

Defining management zones in a 2nd crop corn production area in the northern region of Paraná state, Brazil

Julio Cezar Franchini dos Santos[1], Henrique Debiasi[2], Ivani de Oliveira Negrão Lopes[3], Carlos Manoel Pedro Vaz[4], Eduardo Antonio Speranza[5], Alvadi Antônio Balbinot Junior[6]

[1] *Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, julio.franchini@embrapa.br*
[2] *Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, henrique.debiasi@embrapa.br*
[3] *Pesquisadora, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, ivani.negrao@embrapa.br*
[4] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, carlos.vaz@embrapa.br*
[5] *Analista, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, eduardo.speranza@embrapa.br*
[6] *Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, alvadi.balbinot@embrapa.br*

RESUMO

A caracterização de atributos do solo e das culturas para estabelecer relações de causa e efeito com a produtividade é um dos maiores desafios da agricultura de precisão, a fim de maximizar a lucratividade em talhões de produção. Fatores importantes para a definição da produtividade muitas vezes não podem ser alterados pelo manejo, como o tipo, a textura e a topografia do solo. Desta forma, mesmo após intervenções, os talhões continuam a apresentar áreas homogêneas do terreno em relação ao potencial produtivo, à eficiência de uso de insumos e ao risco de impacto ambiental. Do ponto de vista econômico e gerencial é importante identificar essas zonas de características bem definidas e seu potencial produtivo associado, passando a gerenciá-las com um manejo sítio-específico. Nesse contexto, este trabalho utilizou a produtividade do milho, parâmetros químicos do solo, a topografia do terreno e índices de vegetação da cultura para estabelecer os fatores mais importantes para definição da produtividade e da lucratividade num talhão de produção no município de Cambé, na região norte do Paraná. A produtividade do milho foi relacionada a parâmetros de fertilidade do solo, que poderiam ser manejados utilizando a aplicação a taxa variável, como os teores de potássio e fósforo no solo, e a fatores permanentes, não manejáveis, associados à topografia. Os fatores associados à topografia foram os mais bem relacionados com a produtividade e lucratividade do milho no talhão. A análise de agrupamento identificou a possibilidade de divisão do talhão em duas zonas de manejo com características distintas. Em se tratando do milho, os dados sugerem que estratégias sítio-específicas como a variação da densidade de plantas poderiam ser utilizadas no talhão de estudo, visando a aumentar a produtividade e reduzir os custos, com impactos positivos na lucratividade da área.

Palavras-chave: topografia, análise de agrupamento, análise multivariada.

ABSTRACT

The characterization of soil and crop attributes in order to establish cause and effect relationship with productivity is a significant challenge in precision agriculture to maximize profitability in the production crop. Important factors for defining productivity, often cannot be changed by management, such as the soil type, texture and topography. In this way, even after interventions, fields continue to present homogeneous areas in relation to productive potential, efficiency of input use and risk of environmental impact. From an economic and managerial point of view, it is important to identify these zones with well-defined characteristics and their associated production potential, starting to manage them with site-specific management. In this context, this work used corn yields, soil chemical attributes, topography and crop vegetation indices to establish the most important factors for defining yields and profitability production plot in the municipality of Cambé in the northern region of Paraná state, Brazil. Corn yield was related to soil fertility parameters, which could be managed using variable rate application, such as soil potassium and phosphorus, and to permanent, unmanageable factors associated with topography. The

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000053

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

factors associated with topography were the best related to corn yield and profitability. The cluster analysis identified the possibility of dividing the plot into two management zones with distinct characteristics. For corn, the data suggest that site-specific strategies such as varying plant density could be used in the study plot to increase productivity and reduce costs, with positive impacts on the profitability of the area.

Keywords: topography, cluster analysis, multivariate analysis.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão tem desenvolvido um conjunto de ferramentas, tecnologias e metodologias que permitem ao produtor conhecer a variabilidade espacial e temporal dos fatores de produção e da produtividade em seus talhões, a custos cada vez menores. Muitos desses fatores são manejáveis, como aqueles relacionados à fertilidade e à acidez do solo. Nesses casos, o uso de aplicações à taxa variável de fertilizantes e corretivos pode contribuir para a redução da variabilidade desses fatores ao longo do tempo, fazendo-se os ajustes necessários para atingir os níveis adequados, de acordo com as características da área. Do ponto de vista das práticas de gestão, a correção da fertilidade é um dos principais fatores controlados pelos produtores. Consequentemente, muitos estudos foram conduzidos no Brasil sobre o efeito da fertilidade sobre os rendimentos da soja e do milho, determinando-se valores de referência para condições variáveis de solo e clima (Pavinato et al., 2017). Uma vez atingido esse estádio técnico, as intervenções passam a ser sob demanda, em função da produtividade, e para a manutenção dos níveis de fertilidade dentro da faixa adequada. Por outro lado, existem fatores importantes para a definição da produtividade que não são manejáveis, como o tipo de solo, a textura do solo e a topografia do terreno. Desta forma, mesmo após intervenções, os talhões continuam a apresentar padrões espaciais de produtividade relativamente permanentes, caracterizando áreas homogêneas do terreno em relação ao potencial produtivo, a eficiência do uso de insumos e risco de impacto ambiental, definidas conceitualmente como zonas de manejo (Bullock et al., 1998; Shanahan et al., 2004; Franz et al., 2020). As zonas de manejo podem ser definidas por meio de várias camadas de informação, sendo as mais comuns o mapa de colheita de safras anteriores, atributos do solo (matéria orgânica e textura), topografia, índices de vegetação das culturas e condutividade elétrica aparente do solo (Bullock et al., 1998; Kravchenko e Bullock, 2000; Fridgen et al., 2004; Shanahan et al., 2004; Brock et al., 2005; Li et al., 2013; Gavioli et al., 2019; Franz et al., 2020). Análises de agrupamento dessas variáveis permitem estabelecer zonas com potenciais produtivos relativos que se repetem ao longo dos anos. A classificação das zonas de manejo em níveis de potencial produtivo permite a utilização de estratégias diferenciadas que visam otimizar os recursos e aumentar a rentabilidade do talhão de produção.

Nesse sentido, em um ambiente típico de produção de milho 2ª safra na região norte do Paraná, foram avaliadas várias camadas de informações e suas possíveis interações para a definição de zonas de manejo permanente, usando técnicas de análise de agrupamento.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido em um talhão de produção, com área de 53 ha, característico do sistema soja/milho 2ª safra, localizado na Fazenda Santa Cândida, no município de Cambé, na região norte do Paraná (latitude 23º10'11'' e longitude 51º14'23'') (Figura 1). A Fazenda Santa Cândida é considerada de médio nível tecnológico, sendo representativa dos sistemas de produção utilizados na região norte do Paraná. O solo no local foi caracterizado como Latossolo Vermelho distroférrico típico, textura muito argilosa (765, 153, 82 g/kg, argila, silte e areia, respectivamente). A precipitação pluviométrica anual média no local é de 1.432 mm. O híbrido de milho AS1633 foi semeado em 20 de fevereiro de 2018, no espaçamento de 50 cm entre linhas e população de 58 mil plantas por ha. O talhão recebeu o manejo adotado pelo produtor, seguindo recomendações técnicas indicadas para a cultura do milho. Entre os dias 16 e 25/7/2018 foi realizada a colheita do talhão com uma colheitadeira automotriz modelo CR6080 da marca New Holland®, equipada com plataforma de 7 m, sensores de fluxo e de umidade e sistema de posicionamento global. Os dados obtidos foram filtrados para eliminar dados discrepantes e inconsistentes, tais como aqueles obtidos pela passagem da automotriz sobre áreas já colhidas ou com plataforma parcialmente utilizada. Após a filtragem foram utilizados 21.651 pontos para elaboração dos mapas. Os dados foram convertidos para a unidade de sacas de 60 kg/ha a 13% de umidade.

Após a colheita do milho, em 20/8/2018, foram coletadas 100 amostras de solo (0-20 cm), seguindo uma grade amostral regular (70 m x 70 m), para caracterização química da área. Cada amostra foi composta

Figura 1. Imagem aérea do talhão avaliado e distribuição espacial dos 100 pontos amostrais (grade regular de 70 m x 70 m) para caracterização química do solo. Fazenda Santa Cândida, Cambé/PR.

por cinco subamostras coletadas ao redor do ponto, por meio de trado do tipo holandês. A localização e a distribuição dos pontos de amostragem são ilustradas na Figura 1. As amostras coletadas foram caracterizadas quanto à textura e à composição química, conforme a metodologia descrita por Claessen (1997). Foram determinados o pH em $CaCl_2$ 0,01M, o carbono orgânico, H+Al, P, K, Ca, Mg, Al, somas de bases, CTC a pH 7,0 e V%.

No momento da amostragem de solo, a topografia do terreno foi avaliada por meio de imagens aéreas obtidas com um VANT do tipo quadricóptero (Phantom 4 Pro®) com câmera com sensor RGB (bandas: red, green e blue). O plano de voo foi previamente definido no aplicativo Pix4D® capture (Pix4D Capture Software, 2020), na altitude de 120 m e 75% de sobreposição longitudinal e 55% lateral. As imagens geradas foram processadas por meio do software Agisoft Metashape v. 1.5.5 (Agisoft Metashape, 2019), gerando ao final do processo o modelo digital de elevação (MDE). Não foram utilizados pontos de controle georreferenciados no solo para correção do MDE. Para a construção da base de dados de altimetria e declividade a partir do MDE, foi utilizada uma série de procedimentos utilizando os softwares Qgis (Geographic Information System, 2022) e Vesper (Minasny et al., 2005). Em síntese, a resolução do MDE foi reduzida de aproximadamente 10 cm para 20 m no Qgis e remodelada por meio de geoestatística no Vesper para dar origem ao modelo digital do terreno (MDT). O MDT foi retornado ao Qgis para o cálculo da declividade. Os dados de declividade também foram remodelados no Vesper. O modelo mais bem ajustado à altitude e à declividade foi o gaussiano, com distância máxima de 200 m. As bases de dados finais foram geradas no programa Qgis, a partir dos dados krigados (Figura 2).

O custo variável de produção, segundo os valores médios regionais estabelecidos pelo Departamento de Economia Rural (Deral) para nov./2017 (Deral, 2022) (insumos e mão de obra: R$ 1.852,00/ha) e a receita obtida pela venda do milho (R$ 30,00/saca de 60 kg), juntamente com a produtividade (sacas/ha), foram utilizados para estimar o lucro operacional de forma espacializada. O índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) da cultura do milho 2ª safra foi determinado para as datas de 8/4/2018, 13/4/2018, 23/4/2018, 28/4/2018 e 22/6/2018, quando a cultura se encontrava entre os estádios V8 e grão farináceo, a partir da razão normalizada das bandas 4 (vermelho) e 8 (NIR) do satélite Sentinel 2, utilizando o programa Qgis [NDVI = (B8-B4)/(B8+B4)]. As imagens foram obtidas a partir da plataforma Copernicus Open Acess Hub (ESA, 2022). As imagens foram corrigidas do nível 1C para 2A por meio do software SNAP (SNAP, 2022)

Os dados de fertilidade do solo foram submetidos à análise geoestatística, utilizando o programa Vesper 1.6 (Minasny et al., 2005). Para cada variável, foi avaliada a existência de dependência espacial, por meio da determinação dos semivariogramas e ajuste de modelos teóricos (esférico, exponencial ou gaussiano). Os modelos foram selecionados com base no menor valor de AIC (*Akaike Information Criteria*), índice calculado utilizando o logaritmo da soma de quadrado residual (Akaike,1979). A partir dos dados krigados, foram elaborados mapas de variabilidade espacial dos atributos medidos, por meio do programa Qgis. Foram calculados os valores médios por ponto de amostragem, a partir dos valores krigados, utilizan-

do o algoritmo de estatísticas zonais do Qgis, considerando subparcelas de 70 m x 70 m (n = 100). A relação entre valores médios obtidos das variáveis (ex: produtividade do milho x altitude) foi determinada por meio de análise de correlação de Pearson, considerando 100 pontos por variável. Finalmente, a declividade, a altitude e o NDVI obtidos em diferentes datas durante o ciclo de desenvolvimento do milho, as variáveis mais bem relacionadas com a produtividade do milho, foram utilizados para definir zonas de manejo com base no algoritmo Ward modificado (Speranza, 2017).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O talhão avaliado apresentou variabilidade espacial para as variáveis topográficas de altimetria e declividade (Figura 2). Os parâmetros variaram de forma diagonal no sentido sudeste para noroeste. Com base na declividade, foi possível estabelecer que no talhão a distribuição nas classes de relevo plano (0-3%), suave ondulado (3-8%) e ondulado (8-20%) seguiu a seguinte ordem de representatividade em termos de área, 24%, 56% e 20%, respectivamente.

A produtividade do milho, alguns parâmetros químicos do solo e o NDVI também apresentaram variabilidade espacial no talhão avaliado. Os padrões de variabilidade foram mais bem relacionados entre as variáveis produtividade do milho, NDVI em diferentes datas, altitude e declividade (Tabela 1). Produtividade e NDV apresentaram o mesmo padrão de variabilidade observado para os parâmetros topográficos, ou seja, variaram de forma diagonal no sentido sudeste para noroeste. No entanto, a produtividade foi correlacionada de forma positiva com o NDVI e declividade e de forma negativa com a altitude. Nesse sentido, é importante ressaltar que a produtividade do milho e o NDVI foram bem relacionados com a posição no relevo, sendo maiores nas posições mais baixas e com maior declive do talhão (Tabela 1). Esses resultados são respaldados por outros estudos que relatam que o escoamento de água e a infiltração no solo são significativamente afetados pela posição da paisagem com maior teor de água no solo em encostas mais bai-

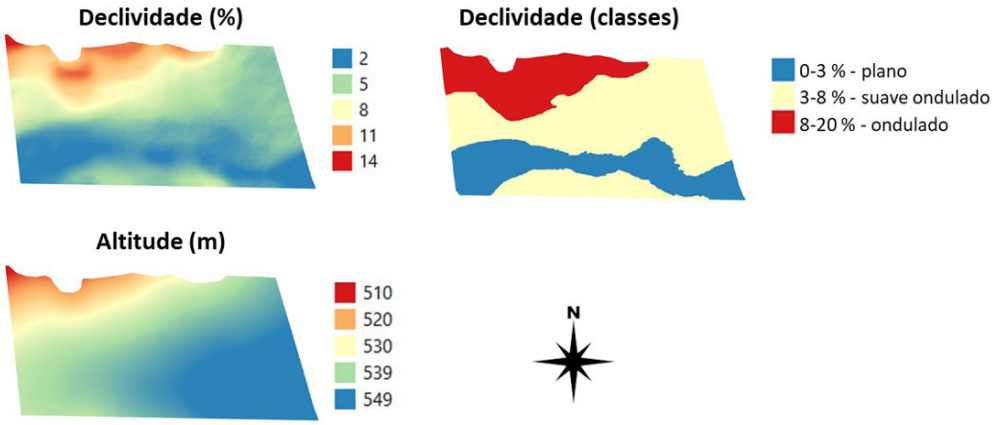


Figura 2. Declividade, classes de declividade e altimetria do talhão avaliado. Fazenda Santa Cândida, Cambé/PR.

Tabela 1. Coeficiente de correlação de Pearson entre a produtividade do milho com parâmetros químicos do solo (K: potássio, P: fósforo, T: capacidade de troca catiônica total, Ca: cálcio), declividade, altitude e NDVI em diferentes datas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura.

	Milho	*08/abr*	*13/abr*	*23/abr*	*28/abr*	*22/jun*
Milho		0.84	0.84	0.82	0.81	0.93
Altitude	-0.83	-0.80	-0.78	-0.73	-0.67	-0.86
Declividade	0.72	0.77	0.76	0.70	0.63	0.63
K	0.60	0.58	0.59	0.56	0.51	0.71
P	-0.50	-0.30	-0.27	-0.20	-0.14	-0.54
T	0.41	0.29	0.30	0.19	0.11	0.56
Ca	0.08	0.04	0.03	-0.07	-0.14	0.27

xas devido ao acúmulo de infiltração e escoamento de água (Kravchenko; Bullock, 2000; Rabia et al., 2022).

Entre os parâmetros químicos de solo, os mais bem relacionados com a produtividade foram os teores de K e P no solo, porém a correlação foi positiva para o primeiro e negativa para o segundo. Esses comportamentos têm indicações práticas diferentes para cada nutriente. No caso do K, em 31% da área foi observado teor menor que 0,25 cmol/dm^3, considerado como crítico para a cultura nese tipo de solo (Debiasi et al., 2021), indicando a necessidade de aplicação corretiva a taxa variável para elevação do teor no solo. Como a correlação foi positiva com a produtividade, isso indica que o teor de K no solo estaria sendo limitante em pelo menos 31% da área do talhão. No caso do P, em apenas 9% da área foi observado teor menor que 9 mg/dm^3, considerado como crítico para a cultura nesse tipo de solo (Debiasi et al., 2021), indicando a necessidade de aplicação corretiva a taxa variável para elevação do teor no solo. Diferente do que foi observado para o teor de K, o teor de P no solo apresentou correlação negativa com a produtividade do milho, indicando que o nutriente não foi o principal fator determinante para a variabilidade da produtividade no talhão. Embora a correlação tenha sido negativa com a produtividade, a correção a taxa variável seria recomendada para as áreas com teor menor do que o valor crítico, uma vez que isso foi observado principalmente na região mais produtiva do talhão. O teor de Ca e a capacidade de troca catiônica total (T) também apresentaram variabilidade espacial, porém apresentaram relações mais fracas com a produtividade do milho.

O lucro operacional obtido pela diferença entre a receita líquida (quantidade produzida x valor de venda) e o custo de produção (insumos e mão de obra) apresentou o mesmo comportamento em termos de variabilidade espacial daquele observado para a produtividade (Figura 3). Quando se consideram os valores de lucro positivo e negativo, observa-se que o primeiro representou 62% e o segundo, consequentemente, 38% da área do talhão. O fator mais importante para a definição das regiões foi a posição relativa no relevo, representada pelas variáveis declividade e altitude, sendo a região mais rentável posicionada na parte mais baixa e de maior declive do talhão.

O comportamento da produtividade e da rentabilidade de forma espacializada e associada a uma característica permanente, como a topografia do terreno, abre a perspectiva para a adoção de práticas de ma-

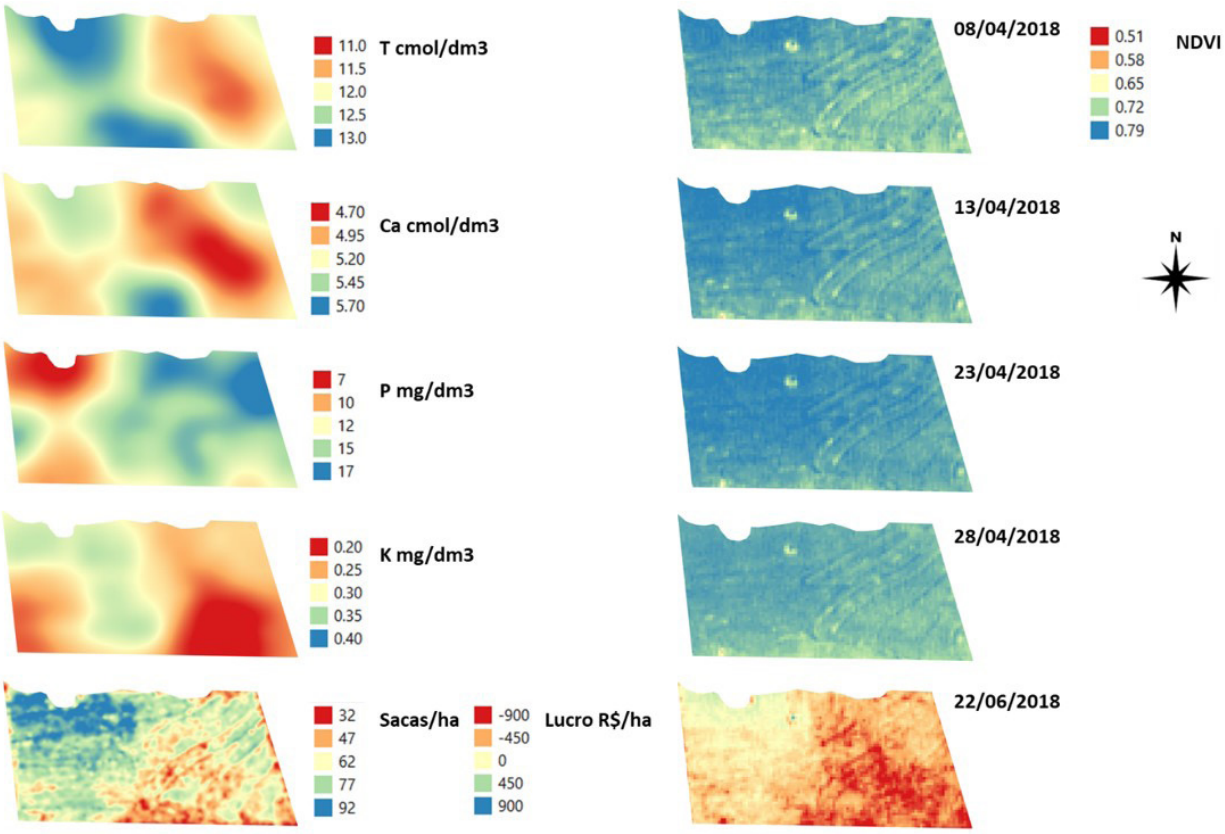


Figura 3. Produtividade (sacas/ha) e lucro operacional (R$/ha) do milho 2a safra, parâmetros químicos do solo (T: capacidade de troca catiônica total) e NDVI em diferentes datas durante o ciclo de desenvolvimento do milho. Fazenda Santa Cândida, Cambé/PR.

nejo sítio-especificas, por meio da definição de zonas de manejo. Os métodos para delinear zonas de manejo podem variar em função das camadas de informações utilizadas e das técnicas para criar os seus limites (Gavioli et al., 2019). No presente estudo utilizamos o algoritmo definido por Speranza (2017) e as seguintes camadas de informações: o mapa de produtividade do milho, as propriedades da paisagem (altitude e declividade) e os índices de vegetação de diferença normalizada da cultura, que estão entre algumas das variáveis que podem ser utilizadas para a análise de agrupamento para a formação de zonas de manejo, citadas por Li et al. (2013) e Franz et al. (2020). Zonas de manejo são definidas como áreas homogêneas do terreno em relação ao potencial produtivo e à eficiência de uso de insumos. Na prática, as variáveis produtividade do milho, NDVI em diferentes datas, declividade e altitude do talhão permitiram identificar duas zonas com características distintas (Figura 4). A ZM2 apresentou produtividade 29% maior do que a ZM1 e foi posicionada na parte mais baixa do talhão e com declividade média de 6%. ZM1 foi posicionada na parte mais alta e plana do talhão. Considerando a época em que o milho 2ª safra é cultivado (fevereiro a julho), essa diferença de potencial produtivo pode estar relacionada à forma como a água se distribui nas diferentes partes do talhão. As partes mais baixas do talhão teriam um estoque maior de água do que as partes mais altas, o que se refletiu diretamente no potencial produtivo. Em estudo recente, Franz et al. (2020), usando abordagens de regressão linear múltipla (MLR), quantificaram que a localização associada à topografia dentro do talhão tinha entre 60% e 85% da importância relativa para modelar padrões de rendimento das culturas.

A divisão do talhão em zonas de manejo com potencial produtivo diferenciado tem implicações diretas no manejo da cultura do milho, com possibilidade de impactar sobre a rentabilidade. Existem informações indicando que a densidade de semeadura de milho pode ser mais bem ajustada ao potencial produtivo de diferentes ambientes (Shanahan et al., 2004; Horbe et al., 2013; Assefa et al., 2016; Schwalbert et al., 2018). No caso do talhão avaliado, uma estratégia interessante seria modificar a distribuição de plantas dentro do talhão, colocando maior e menor população de plantas de acordo com o potencial produtivo das zonas identificadas. Segundo os resultados apresentados por Schwalbert et al. (2018), a redução da população de plantas em ambientes de menor potencial produtivo, como a ZM1, pode por um lado aumentar a produtividade e por outro reduzir o custo, sendo, portanto, uma estratégia com grande potencial para aumentar a rentabilidade dessa zona, que foi a responsável por diminuir a rentabilidade do talhão. Por outro lado, na ZM2 o aumento de população te-

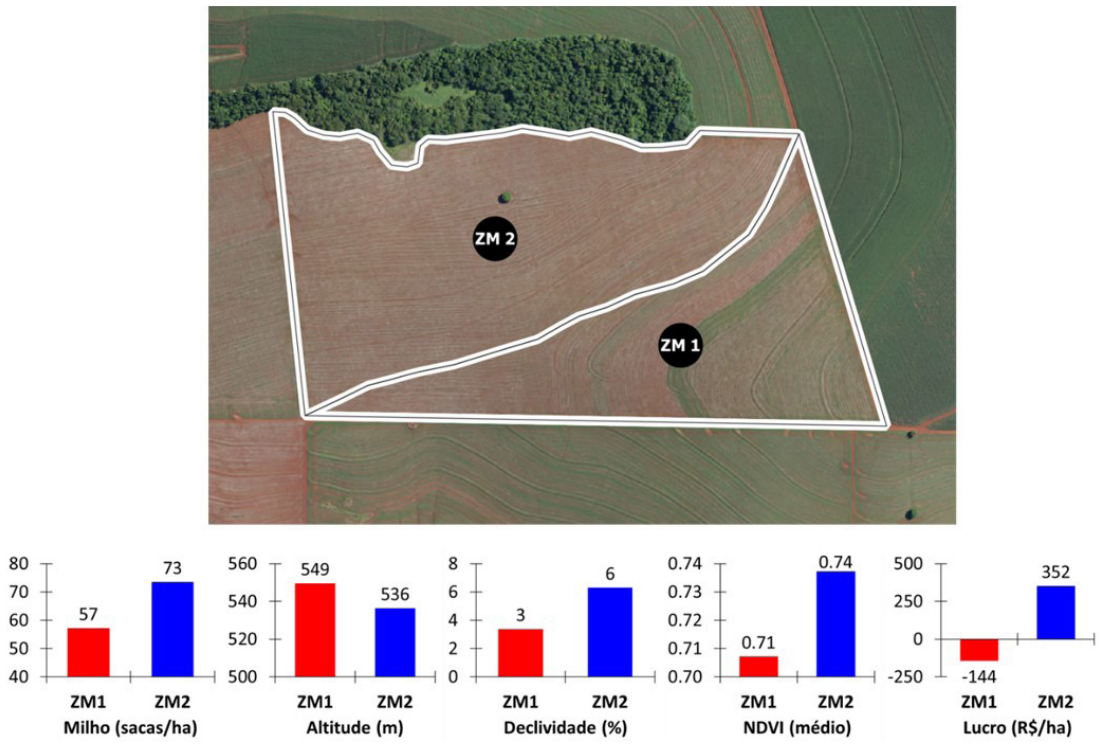


Figura 4. Zonas de manejo (ZM1 e ZM2) definidas pelo algoritmo Ward modificado, utilizando as variáveis produtividade do milho, declividade, altitude e NDVI em diferentes datas durante o ciclo de desenvolvimento do milho, e gráficos de barra com valores médios das variáveis em cada zona. O NDVI (médio) representa a média dos valores observados em cinco datas. Fazenda Santa Cândida, Cambé/PR.

ria potencial para aumentar a produtividade considerando que nesta região existe maior disponibilidade de água para a cultura.

4 CONCLUSÕES

Os resultados do trabalho demonstram que para o ambiente de produção de milho 2ª safra predominante na região norte do Paraná, o potencial produtivo tem forte relação com a posição na paisagem. A definição de zonas de manejo, com potenciais produtivos diferenciados, pode ser determinada utilizando-se índices de vegetação como o NDVI e parâmetros topográficos, como a altitude e a declividade. O ajuste da população de plantas de milho, em função do potencial produtivo, deve ser incorporado no gerenciamento técnico do sistema de produção, com possibilidade de aumento na rentabilidade.

AGRADECIMENTOS

Ao proprietário da Fazenda Santa Cândida, Antônio Casarotto, e funcionários, pelo compromisso e apoio, imprescindíveis a este trabalho de experimentação *on farm*.

REFERÊNCIAS

AGISOFT METASHAPE. **1.5.5. Software**, 2019. Disponível em: https://www.agisoft.com. Acesso em: 02 mar. 2024.

AKAIKE, H. A Bayesian Extension of the minimum AIC procedure of autoregressive model fitting. **Biometrika**, v. *66*, n. 2, p. 237-242, 1979. DOI: http://doi.org/10.1093/biomet/66.2.237.

ASSEFA, Y.; PRASAD, P. V. V.; CARTER, P.; HINDS, M.; BHALLA, G. Yield responses to planting density for us modern corn hybrids: a synthesis-analysis. **Crop Science**, v. *56*, n. 5, p. 2802-2817, 2016. DOI: http://doi.org/10.2135/cropsci2016.04.0215.

BROCK, A.; BROUDER, S. M.; BLUMHOFF, G.; HOFMANN, B. S. Defining yield-based management zones for corn–soybean rotations. **Agronomy Journal**, v. *97*, n. 4, p. 1115-1128, 2005. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj2004.0220.

BULLOCK, D. G.; BULLOCK, D. S.; NAFZIGER, E. D.; DOERGE, T. A.; PASZKIEWICZ, S. R.; CARTER, P. R.; PETERSON, T. A. Does variable rate seeding of corn pay. **Agronomy Journal**, v. *90*, n. 6, p. 830-836, 1998. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj1998.00021962009000060019x.

CLAESSEN, M. E. C. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; SANTOS, E. L.; CECCATTO, S. K.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; CONTE, O.; NUNES, E. S.; FURLANETTO, R. H. **Diagnóstico da qualidade do manejo e impacto de modelos de produção aprimorados sobre a fertilidade do solo nas regiões Norte e Noroeste do Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2021. 69 p.

DERAL. **Referências anuais dos custos de café, feijão, milho, mandioca, soja e trigo, desde 1994**, 2022. Disponível em: https://www.agricultura.pr.gov.br/CustosProducao. Acesso em: 02 mar. 2024.

ESA. **Copernicus Open Access Hub**, 2022. Disponível em: https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home. Acesso em: 02 mar. 2024.

FRANZ, T. E.; POKAL, S.; GIBSON, J. P.; ZHOU, Y.; GHOLIZADEH, H.; TENORIO, F. A.; RUDNIK, D.; HEEREN, D.M.; MCCABE, M.F.; ZILIANI, M.; JIN, Z.; GUAN, K.; PAN, M.; GATES, J.; WARDLOW, B. The role of topography, soil, and remotely sensed vegetation condition towards predicting crop yield. **Field Crops Research**, v. *252*, p. 107788, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107788.

FRIDGEN, J. J.; KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S. T.; WIEBOLD, W. J.; FRAISSE, C. W. Management zone Analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. **Agronomy Journal**, v. *96*, n. 1, p. 100-108, 2004. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj2004.1000.

GAVIOLI, A.; DE SOUZA, E. G.; BAZZI, C. L.; SCHENATTO, K.; BETZEK, N. M. Identification of management zones in precision agriculture: an evaluation of alternative cluster analysis methods. **Biosystems Engineering**, v. *181*, p. 86-102, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.02.019.

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM, 2021. Disponível em: http://qgis.org. Acesso em: 02 mar. 2024.

HORBE, T. A. N.; AMADO, T. J. C.; FERREIRA, A. O.; ALBA, P. J. Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil. **Precision Agriculture**, v. *14*, n. 4, p. 450-465, 2013. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-013-9308-7.

KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D. G. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. **Agronomy Journal**, v. *92*, n. 1, p. 75-83, 2000. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj2000.92175x.

HORBE, T. A. N.; AMADO, T. J. C.; FERREIRA, A. O.; ALBA, P. J. Definition of management zones for enhancing cultivated land conservation using combined spatial data. **Environmental Management**, v. *52*, n. 4, p. 792-806, 2013. DOI: http://doi.org/10.1007/s00267-013-0124-7.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. **Vesper 1.62 – spatial prediction software for precision agriculture**. Sidney: Australian Centre for Precision Agriculture (ACPA), University of Sydney, 2005.

PAVINATO, P. S.; PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V.; MOREIRA, A.; MOTTA, A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. Curitiba: SBCS/NEPAR. 2017. 482 p.

PIX4D CAPTURE SOFTWARE, 2020. Disponível em: https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture. Acesso em: 02 mar. 2024.

RABIA, A. H.; NEUPANE, J.; LIN, Z.; LEWIS, K.; CAO, G.; GUO, W. Principles and applications of topography in precision agriculture. Editor(s): SPARKS, D.L. **Advances in Agronomy**, v. *171*, p. 143-189, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.08.005.

SCHWALBERT, R.; AMADO, T. J. C; HORBE, T. A. N; STEFANELLO, L. O.; ASSEFA, Y.; VARA PRASAD, P. V.; RICE, C. W.; CIAMPITTI, I. A. Corn yield response to plant density and nitrogen: spatial models and yield distribution. **Agronomy Journal**, v. *110*, n. 3, p. 970-982, 2018. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj2017.07.0425.

SHANAHAN, J. F.; DOERGE, T. A.; JOHNSON, J. J.; VIGIL, M. F. Feasibility of site-specific management of corn hybrids and plant densities in the great plains. **Precision Agriculture**, v. *5*, n. 3, p. 207-225, 2004. DOI: http://doi.org/10.1023/B:PRAG.0000032762.72510.10.

SNAP. **SNAP desktop applications**, 2022. Disponível em: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/04/SNAP_desktop. Acesso em: 02 mar. 2024.

SPERANZA, E. A. **Mineração de dados espaciais aplicada no delineamento de unidades de gestão diferenciada em agricultura de precisão**. 2017. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12946. Acesso em: 02 mar. 2024.

40

Delineamento de potenciais zonas de manejo para intervenções espacialmente diferenciadas para as culturas de algodão, soja e milho

Delineation of potential management zones for spatially differentiated interventions for cotton, soybean, and corn crops

Eduardo Antonio Speranza[1], Ivani de Oliveira Negrão Lopes[2], Carlos Manoel Pedro Vaz[3], Julio Cezar Franchini dos Santos[4], Ricardo Yassushi Inamasu[5], Ladislau Marcelino Rabello[6], Lucio André de Castro Jorge[7]

[1] *Analista, Embrapa Agricultura Digital, Barão Geraldo, Campinas (SP), Brasil, eduardo.speranza@embrapa.br*
[2] *Pesquisadora, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, ivani.negrao@embrapa.br*
[3] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, carlos.vaz@embrapa.br*
[4] *Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, julio.franchini@embrapa.br*
[5] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, ricardo.inamasu@embrapa.br*
[6] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, ladislau.rabello@embrapa.br*
[7] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, ladislau.rabello@embrapa.br*

RESUMO

Este trabalho descreve uma metodologia aplicada ao delineamento de potenciais zonas de manejo para implantação experimental de atividades de intervenção espacialmente diferenciadas em agricultura de precisão para as culturas de algodão, soja e milho. Abrange diferentes algoritmos de agrupamento de dados disponíveis na literatura e diferentes conjuntos de atributos que descrevem a física do solo e as características de fertilidade, condutividade elétrica do solo, índices de vegetação e mapas de produtividade. O valor dos agrupamentos obtidos, frente à tarefa de delimitar zonas de manejo é inferido com base na habilidade de cada combinação de parâmetros em gerar grupos que maximizam a homogeneidade de produtividade.

Palavras-chave: variabilidade espacial; agrupamento de dados; experimentação *on-farm*.

ABSTRACT

This work describes a methodology applied to the delineation of potential management zones for the experimental implementation of spatially differentiated intervention activities in precision agriculture for cotton, soybean and corn crops. It encompasses different data clustering algorithms available in the literature and different sets of attributes describing soil physics and fertility features, soil electrical conductivity, vegetation indices, and yield maps. The potential of each outcome to serve as management zones is inferred considering the ability of each configuration to produce groups able to maximize yield homogeneity.

Keywords: spatial variability; data clustering; on-farm experimentation.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000054

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de tecnologias de informação e comunicação (TICs) capazes de coletar, processar e compartilhar dados de relevo, solo, cultura e clima de uma área de produção, quando aplicadas para a identificação e tratamento da variabilidade espacial em agricultura de precisão (AP), caracterizam o conceito de agricultura digital. Um dos conceitos utilizados para realizar essa identificação e tratamento é a subdivisão das áreas de produção em zonas de manejo (ZM) (Doerge, 1999). Essa subdivisão deve se manter relativamente constante ao longo do tempo e, para tanto, deve ser determinada a partir de atributos não antropizados e relacionados principalmente ao solo e à cultura, além do conhecimento do próprio produtor.

A literatura apresenta diversas abordagens computacionais que podem ser utilizadas para o delineamento de ZM, a maioria delas considerando algoritmos de classificação não supervisionados (sem classificação prévia), conhecidos como algoritmos de agrupamento. Gavioli et al. (2019) realizaram um estudo comparando a eficiência e eficácia para delineamento de ZM de 20 algoritmos de agrupamentos distintos, onde foram obtidos desempenhos considerando diferentes situações. Neste trabalho, são descritos a metodologia utilizada e os resultados obtidos no delineamento de ZM para talhões experimentais de produção de algodão, soja e milho localizados no estado de Mato Grosso. O objetivo principal foi auxiliar na estratégia para construção de experimentação *on-farm* (Bullock et al. 2019; Shiratsuchi et al. 2019) para identificação de recomendações de aplicação de insumos e corretivos à taxa variada. Para este trabalho, foram utilizadas abordagens de agrupamento distintas para duas áreas experimentais distintas, considerando diferentes tipos de dados de entrada. Os algoritmos Flexible-beta (Lance; Willians, 1967) e Ward (Ward Júnior, 1963) foram utilizados para delineamento de ZM para um talhão experimental que recebeu as culturas de soja, milho e algodão, em períodos intercalados de safra e safrinha, nos anos de 2019 e 2020. Adicionalmente, foram obtidos agrupamentos de consenso (*ensembles*) para os resultados obtidos com essas abordagens.

A abordagem SWMU Clustering (Speranza, 2017), baseada no algoritmo de Ward e que possui o viés de gerar mapas de ZM que mantenha estruturas espaciais contíguas, foi utilizada para o delineamento de ZM em um talhão experimental contendo exclusivamente a cultura do algodão.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado considerando dois talhões experimentais. O primeiro deles (talhão A), com aproximadamente 100 ha, pertence ao grupo agrícola Sementes Petrovina e está localizado em Pedra Preta/MT, com coordenadas centrais (lon, lat) O 54º4'18.94'', S 16º52'53.72'' no *datum* WGS84 (Figura 1a). Para esse talhão, foram utilizados dados de 2019, onde ocorreu o cultivo da soja e do milho, e de 2020, onde a cultura do milho foi substituída pela cultura do algodão, além de dados de condutividade elétrica aparente (CEa) e textura do solo obtidos em 2017. Com relação ao sistema de cultivo desse talhão, foi utilizada a sequência soja-algodão (safra 2017-2018), soja-milho (2018-2019) e soja-algodão (2019-2020) nas últimas três safras, em sistema de plantio direto, mas sem a utilização de cultura de cobertura na entressafra entre a colheita do milho (ou algodão) e o plantio da soja. O segundo (talhão B), com aproximadamente 170 ha, pertence ao grupo agrícola Amaggi e está localizado em Sapezal/MT, com coordenadas centrais (lon, lat) O 58º52'59.28'', S 13º35'4.07'' no *da-*

Figura 1. Delimitação de área dos talhões experimentais utilizados: (a) talhão A, de 100 ha, pertencente ao grupo Sementes Petrovina; e (b) talhão B, de 170 ha, pertencente ao grupo Amaggi.

tum WGS84 (Figura 1b). Para esse talhão, foram utilizados dados de monitoramento da safra do algodão de 2020. O sistema de cultivo desse talhão nas últimas três safras foi de algodão de primeira safra em sistema de plantio direto e crotalária na entressafra (algodão-crotalária).

Para o talhão A, foram utilizadas diferentes combinações de atributos para o delineamento de ZM, a partir de dados coletados em campo. Em 2017, foram gerados mapas de CEa do solo em duas profundidades (30 cm e 90 cm). Em 2019, foram coletadas 70 amostras de solo em grade igualmente espaçada (100 m x 150 m) na profundidade 0-20 cm para análise do teor dos atributos pH, P, K, Ca, Mg, V, CTC, Cu, Fe, Mn e Zn e também para a identificação do teor de argila. Por ser uma área com histórico de incidência de nematoides, foram coletadas amostras utilizando essa mesma grade espacial para análise da presença dos nematoides das espécies *Pratylenchus brachyurus*, *Rotylenchulus reniformis* e *Heterodera glycines* tanto no solo quanto na raiz em 2019, com análise repetida para a primeira e segunda espécies em 2020. Os dados referentes à cultura correspondem aos mapas dos índices de vegetação NDVI e NDWI obtidos a partir de imagens do satélite Sentinel-2 nos meses de março, abril e maio de 2020; e mapas de produtividade da soja (2019), milho (2019) e algodão (2020). Para este estudo, os dados com alta densidade de pontos, como CEa do solo, mapas de produtividade e índices de vegetação, foram transformados em valores médios dentro de cada uma das células da grade de 70 m pré-definida para a análise de solo. Assim, todos os atributos coletados se referiam à mesma unidade de área, permitindo sua utilização nas análises de agrupamento realizadas. O conjunto de dados final possui 33 atributos e 70 amostras, o que não é usual no delineamento de ZM para AP, onde normalmente são utilizados altas densidades espaciais e conjuntos reduzidos de atributos. Adicionalmente, esse conjunto de dados foi pré-agrupado em 14 diferentes subconjuntos (categorias), cada um deles utilizado individualmente como entrada para os algoritmos de agrupamento (Tabela 1).

Considerando a Tabela 1, foram realizadas cinco diferentes análises de componentes principais, considerando todos os atributos (PCATodos), apenas atributos coletados em 2019 (PCA19), apenas atributos do solo coletados em 2019 (PCA19Sol), todos os atributos coletados em 2020 (PCA20) e todos os atributos de solo coletados em 2020 (PCA20Sol). O grupo Todos contém todos os atributos do conjunto de dados (incluindo os índices de vegetação NDVI e NDWI em 2020), e os grupos Atr19 e Atr20 contêm todos os atributos obtidos em 2019 e 2020, respectivamente. O grupo Atr19Sol possui apenas os atributos de solo coletados em 2019 e o grupo Atr20Sol apenas os atributos de solo coletados em 2020. Nema19 e Nema20 compõem os atributos referentes à incidência de nematoides em 2019 e 2020. Finalmente, o grupo AnaliseS possui todos os atributos referentes à análise química de fertilidade do solo e o grupo FiSolo possui os atributos do grupo AnaliseS acrescido dos atributos referentes à física do solo.

Para a execução desse experimento, foram utilizados os algoritmos Flexible e Ward considerando os diferentes conjuntos de dados de entrada descritos na Tabela 2. Devido às diferenças visualizadas nos mapas de zonas de manejo obtidos com as diferentes combinações de atributos de entrada e a utilização dos dois algoritmos de maneira individual, foram gerados agrupamentos de consenso a partir da abordagem de *ensemble* de agrupamentos baseada em acúmulo de evidências desenvolvida por Fred e Jain (2005).

Para o talhão B, foram utilizados para o delineamento das ZM todos os atributos obtidos durante a safra do algodão de 2019: CEa do solo nas profundidades de 30 cm e 90 cm, mapas de índices de vegetação NDVI e NDRE nos meses de maio e junho e mapa de produtividade, obtido durante a colheita realizada no mês de agosto. Nesse caso, como todos atributos possuíam alta densidade espacial, foi realizada uma reamostragem de todos eles para uma grade regular de 10 m x 10 m, considerando os valores médios obtidos dentro de cada célula (Figura 2).

A partir desses atributos, o delineamento de ZM foi realizado utilizando-se a abordagem de agrupamento SWMU Clustering, com os seguintes parâmetros: $k = 200$ para a tesselação inicial, indicando que o agrupamento hierárquico será iniciado com 200 grupos divididos espacialmente; $maxDMC = 5$, indicando que serão gerados mapas com no máximo 5 ZM; e $porcDMU = 5\%$, indicando que uma ZM deve ocupar no mínimo 5% da área total do talhão. A definição desses parâmetros é importante para reduzir o grau de estratificação dos mapas de ZM gerados.

Com a definição dos atributos de entrada e algoritmos e abordagens de agrupamento para cada uma das duas situações, os procedimentos de delineamento de ZM foram executados para as duas áreas, proporcionando resultados que são exibidos e discutidos a seguir.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o talhão A, foi gerado um total de 168 agrupamentos distintos para potenciais mapas de zonas de

Tabela 1. Pré-agrupamento de atributos para utilização por algoritmos de agrupamento para o delineamento de ZM.

Categorias	Prod			NDVI - 2020			NDWI-2020			Física solo			Nema19						Nema20				Análise de solo - 2019									
	So19	Mi19	Al20	Mar	Abr	Mai	Mar	Abr	Mai	CE 30	CE90	Arg	Gr	Gs	Pr	Ps	Rr	Rs	Pr	Ps	Rr	Rs	pH	P	K	Ca	Mg	V	CTC	Cu	Fe	Mn	Zn
PCATodos	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
PCA19	x	x											x	x	x	x	x	x														
PCA19Sol	x	x								x	x	x	x	x	x	x	x	x					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
PCA20			x	x	x	x	x	x	x										x	x	x	x										
PCA20Sol			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Todos	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Atr19	x	x											x	x	x	x	x	x														
Atr19Sol	x	x								x	x	x	x	x	x	x	x	x					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Atr20			x	x	x	x	x	x	x										x	x	x	x										
Atr20Sol			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Nema19													x	x	x	x	x	x														
Nema20																			x	x	x	x										
AnaliseS																							x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
FiSolo										x	x	x											x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

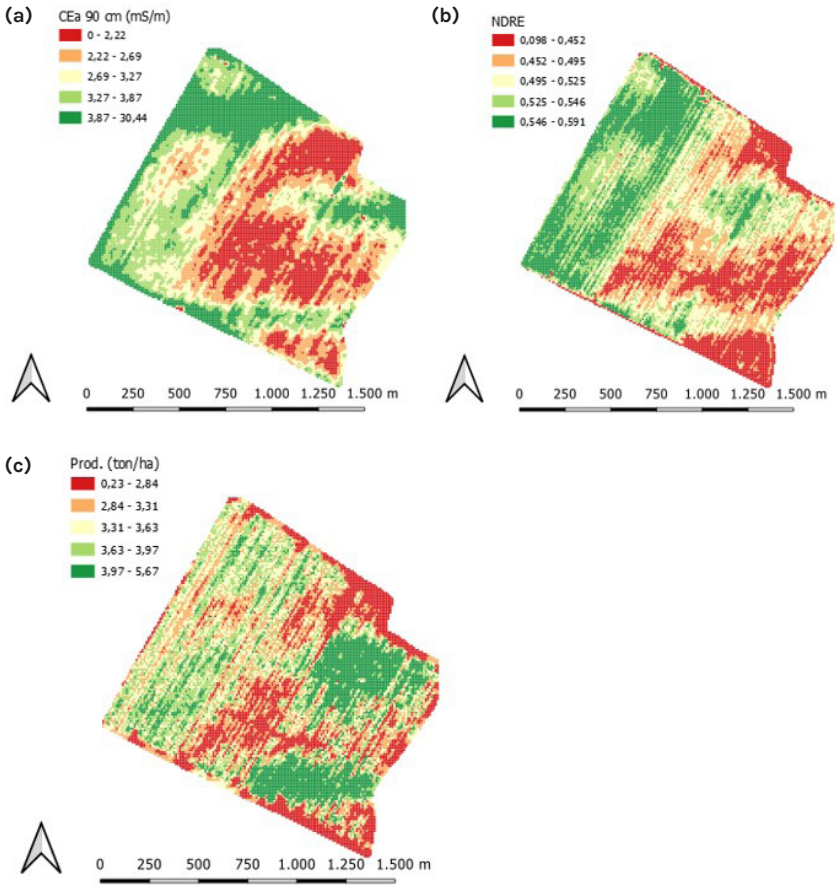


Figura 2. Exemplos de mapas utilizados no delineamento de ZM para o talhão B: (a) CEa do solo a 90 cm; (b) NDRE; e (c) produtividade.

Tabela 2. Estatística F para o fator grupo (F_g) obtido em cada um dos 168 agrupamentos gerados no experimento, considerando diferentes combinações de atributos, algoritmos e quantidades de grupos.

Atributos	Soja (2019)				Milho (2019)				Algodão (2020)			
	Flexlible-β		Ward		Flexlible-β		Ward		Flexlible-β		Ward	
	k=3	k=4	k=3	k=4	k=3	k=4	k=3	k=4	k=3	k=4	k=3	k=4
PCATodos	27,0	17,8	24,1	15,8	1,0	13,4	2,2	15,4	21,3	14,0	15,8	10,4
PCA19	1,5	7,6	23,3	17,9	3,3	4,2	**20,6**	13,6	1,3	5,7	7,4	5,0
PCA19Sol	26,3	24,2	30,6	21,4	1,0	0,7	11,8	8,4	11,5	14,4	20,4	20,6
PCA20	8,3	10,8	10,0	14,9	0,1	0,2	0,4	0,3	8,1	15,4	8,7	17,2
PCA20Sol	12,9	16,0	13,9	14,5	1,4	1,0	2,0	1,3	16,9	14,8	8,6	10,1
Todos	**37,7**	25,3	20,0	15,9	2,7	1,8	1,9	1,7	**34,4**	26,9	15,2	21,4
Atr19	9,9	6,6	10,4	10,3	4,4	**24,4**	4,4	11,1	8,7	5,7	9,4	6,7
Atr19Sol	16,4	32,9	**43,2**	30,6	1,5	2,4	3,0	3,1	12,1	28,5	15,6	11,6
Atr20	10,8	12,7	10,5	7,4	0,2	0,2	0,6	0,5	15,2	22,2	24,3	16,6
Atr20Sol	27,8	18,5	28,0	19,7	1,2	1,1	0,0	0,7	**38,3**	28,3	**42,7**	29,5
Nema19	5,4	3,6	6,6	6,8	1,6	1,5	1,6	1,0	14,6	10,0	8,4	16,4
Nema20	10,0	7,3	19,1	12,6	2,6	1,7	3,0	2,1	19,4	12,8	19,2	16,3
AnaliseS	**42,7**	**49,0**	**60,2**	**39,7**	5,3	3,5	1,1	1,9	22,5	19,2	22,9	15,3
FiSolo	0,3	5,6	6,4	5,6	2,9	3,4	0,4	3,4	1,1	4,5	5,5	4,5

manejo, considerando: as 14 categorias distintas de atributos (Tabela 1); três diferentes safras (soja-2019, milho-2019 e algodão-2020); dois diferentes algoritmos (Ward e Flexible); e duas diferentes quantidades de grupos (ou ZM) para cada caso (três e quatro grupos). As quantidades de grupos foram definidas com base nas distâncias entre os grupos, visualizadas nos dendogramas. Para avaliar se os agrupamentos obtidos seriam bons delimitadores de zonas de produtividades mais homogêneas, foi utilizada a estatística F referente ao fator grupo (F_g), no modelo de análise de variância (anava): $P_{ij} = \mu + g_i + e_{ij}$. Nesse modelo, P_{ij} representou a produtividade de um pixel j dentro de um grupo i, μ a produtividade média do talhão, g_i o efeito do grupo i e e_{ij} a diferença entre a produtividade do pixel e a produtividade média do grupo. Como em todo modelo ANOVA com um único fator, *F* é a razão das variâncias entre e dentro de grupos. Assim, quanto maior o valor de F_g, mais forte a evidência de que as produtividades dos pixels dentro dos grupos obtidos (zonas candidatas) são mais homogêneas. A Tabela 2 exibe os valores de *F* obtidos para cada um dos 168 agrupamentos gerados.

Os resultados da Tabela 2 mostram que os melhores resultados foram obtidos com a utilização dos atributos relacionados à fertilidade do solo obtidos na safra de soja de 2019, mesmo com a variação de algoritmos e quantidade de grupos utilizada. A utilização de todos os atributos do solo para as safras de soja de 2019 e algodão de 2020, nesse caso considerando três grupos, também apresentou bons resultados. Um resultado importante também exibido na Tabela 2 pode ser verificado com o uso de PCA, que não se mostrou eficiente no pré-processamento dos dados para análise de agrupamento. Considerando os melhores agrupamentos exibidos na Tabela 2, foram realizadas análises utilizando a metodologia de *ensembles* desenvolvida por Fred e Jain (2005), para as seguintes combinações: (I) conjunto de atributos Atr20Sol e os agrupamentos gerados utilizando o algoritmo Flexible (para três grupos) e o algoritmo de Ward (para três grupos); (II) conjunto de atributos AnaliseS e agrupamentos gerados utilizando o algoritmo Flexible (três e quatro grupos) e o algoritmo de Ward (três e quatro grupos); (III) conjuntos de atributos Todos, Atr20Sol e AnaliseS e o algoritmo Flexible (para três e quatro grupos); e (IV) conjuntos de atributos Atr19Sol, Atr20Sol e AnaliseS e o algoritmo Ward (para três e quatro grupos). O melhor resultado obtido, segundo os valores de F_g, foi para a combinação IV para três grupos, obtendo o valor 53. Apesar de apresentar um valor mais baixo que a melhor solução exibida na Tabela 2, onde a utilização do algoritmo de Ward para três grupos e a utilização do conjunto de dados de fertilidade do solo para a safra de soja de 2019 apresentou F_g igual a 60, essa solução pode ser utilizada como agrupamento de consenso quando se deseja observar não apenas os atributos de fertilidade, mas também todos os atributos relacionados ao solo, inclusive os obtidos em outras safras. A Figura 3 exibe os dois melhores mapas obtidos nessa análise.

A Figura 4 exibe os mapas de zonas de manejo obtidos para o talhão B, a partir da metodologia definida previamente. Apesar de o algoritmo SWMU Clustering ter sido executado para fornecer mapas contendo de duas a cinco ZMs, os mapas com quatro e cinco ZMs

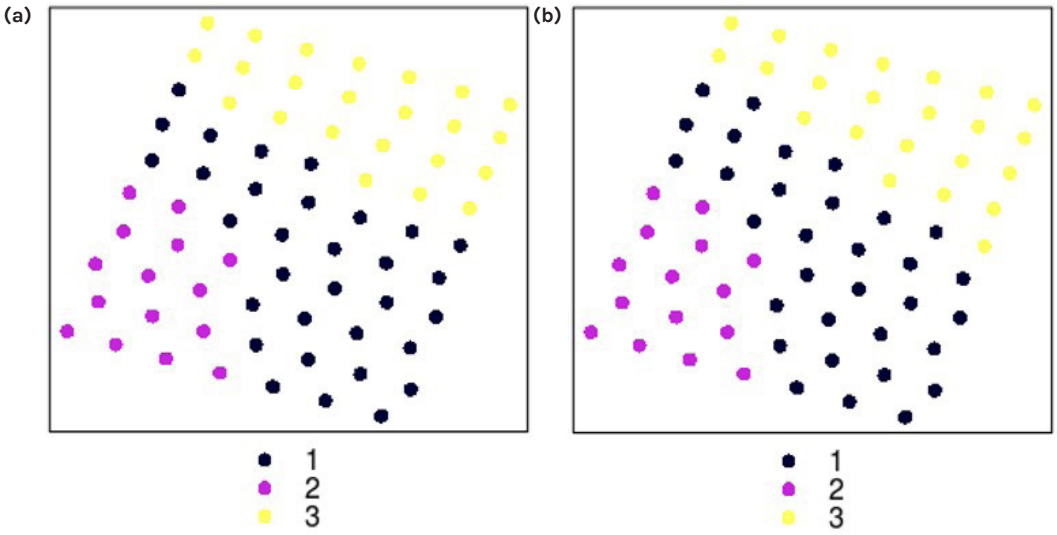


Figura 3. Melhores agrupamentos obtidos para o talhão A, considerando: (a) dados de fertilidade do solo, algoritmo de Ward para três grupos para a safra de soja de 2019; e (b) *ensemble* com três grupos considerando agrupamentos obtidos com o algoritmo de Ward (três e quatro grupos originalmente) e os diferentes conjuntos de atributos relacionados à fertilidade do solo e todos os atributos de solo (nas safras de 2019 e 2020), também gerados para a safra de soja de 2019.

não foram gerados, pois possuíam alto nível de estratificação, contendo partes disjuntas de ZMs com área menor do que 5% da área total.

Adicionalmente, a Tabela 3 apresenta os valores médios de cada uma das sete variáveis utilizadas para a obtenção das ZMs (NDVI e NDRE em duas datas, CEa do solo em duas profundidades e produtividade), separados por ZM para os mapas contendo duas e três ZMs.

A partir da Tabela 3, podemos analisar cada variável e concluir qual seria a separação mais adequada (2 ou 3 ZM), de forma a garantir que o mapa de ZM escolhido proporcione uma melhor redução da variabilidade espacial para a área de estudo.

Para os dados de CEa, nas duas profundidades, é possível verificar que a ZM 1, para o mapa de três ZMs, possui valores próximos à média geral, enquanto que as ZMs 2 e 3 possuem valores abaixo e acima da média, respectivamente. Nesse caso, se considerarmos apenas duas ZMs, estaríamos deixando de destacar uma região com valores de CEa muito acima da média, como a ZM 3. Considerando os dados de índice de vegetação, embora os valores absolutos sejam bastante próximos, é possível verificar melhores respostas da ZM 1 e da ZM 3 com relação à ZM 2, da mesma forma que observado para os valores de CEa do solo. Finalmente, considerando a produtividade, podemos destacar, no mapa contendo três ZMs, valores menores para a ZM 2 em comparação com as ZMs 1 e 3. No entanto, a ZM 1 se mostrou uma área mais produtiva do que a ZM 3, ou seja, com um comportamento contrário se observarmos os dados da CEa do solo e índices de vegetação.

A partir dessas análises, considerando o mapa com três ZMs, é possível verificar que a ZM 2 é uma área com textura de solo mais arenosa, conforme indicado pelos dados de CEa e, consequentemente, com potencial produtivo menor, que pode ser observado nos

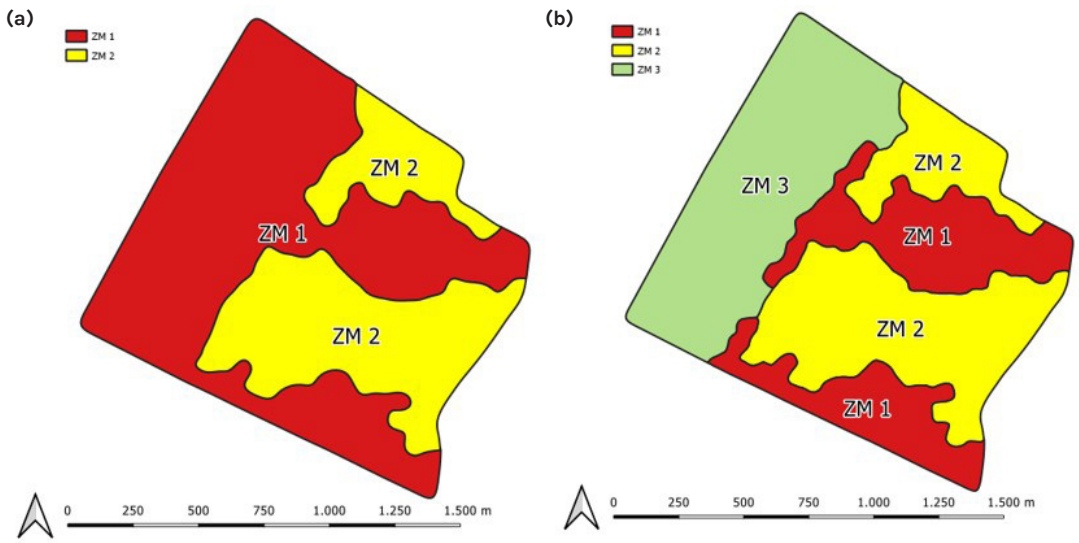


Figura 4. Mapas de ZM delineados para o talhão B, escolhidos a partir da análise de redução da variância de produtividade, contendo: (a) dois ZM e (b) três ZM.

Tabela 3. Valores médios para todas as variáveis, considerando as zonas de manejo e também a área total.

Atributo	Total		2 ZM		3 ZM		
	Média	DP	1	2	1	2	3
CEa-30 (mS/m)	3,14	1,14	3,53	2,39	3,14	2,39	3,84
CEa-90 (mS/m)	0,87	1,70	1,43	-0,12	0,73	-0,12	1,98
NDVI-1	0,87	0,06	0,89	0,86	0,89	0,87	0,90
NDRE-1	0,49	0,04	0,51	0,46	0,49	0,46	0,52
NDVI-2	0,86	0,08	0,88	0,83	0,87	0,83	0,89
NDRE-2	0,50	0,06	0,53	0,46	0,50	0,46	0,54
Produtividade (ton/ha)	3,40	0,76	3,63	3,07	3,74	3,06	3,55

dados de produtividade. Entretanto, a ZM 3, apesar de possuir um potencial produtivo maior que a ZM 1, de acordo com os dados de CEa e índices de vegetação, apresentou valores de produtividade mais baixos. Desse modo, é importante que a ZM 1 e a ZM 3 sejam investigadas separadamente, para que possam ser verificadas as causas de a produtividade maior ter sido obtida na ZM 1.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho descreveu a metodologia utilizada e os resultados obtidos para o delineamento de zonas de manejo para talhões experimentais da produção de algodão, soja e milho, localizados no estado de Mato Grosso, com o objetivo de subsidiar a implementação de experimentação *on-farm*. Foram utilizados conjuntos distintos de dados de entrada para as duas situações: para o talhão A foram considerados vários atributos do solo e dois índices de vegetação (NDVI e NDWI), com uma densidade amostral baixa de aproximadamente uma amostra a cada 2 ha; para o talhão B, foram considerados apenas atributos coletados com alta densidade de pontos em campo, como os mapas de CEa do solo e produtividade e os índices de vegetação gerados a partir de imagens de drone, ajustados em grade espacial de 10 m de resolução (aproximadamente mil amostras por ha). Com relação à metodologia, para o talhão A foram utilizados os algoritmos Ward e Flexible individualmente e a abordagem de *ensemble* baseada em acúmulo de evidências para obtenção de agrupamentos de consenso. Nesse caso, a qualidade dos agrupamentos foi inferida pela estatística *F* para o fator grupo na análise de variância. Já para o talhão B, foi utilizado o algoritmo SWMU Clustering, que proporciona a obtenção de zonas de manejo com redução da estratificação espacial. Nesse caso, foram utilizados os valores médios de cada variável usada, obtidos em cada zona de manejo delineada, como forma de definir qual seria a melhor alternativa dentre os mapas obtidos. De maneira geral, para ambos os casos, as metodologias utilizadas proporcionaram o delineamento de zonas de manejo capazes de reduzir a variabilidade espacial das áreas estudadas e que possam ser utilizadas para o delineamento de experimentos *on-farm*.

AGRADECIMENTOS

Aos grupos agrícolas Amaggi e Sementes Petrovina e ao Instituto Matogrossense do Algodão (IMAmt), pelo suporte às coletas de dados realizadas.

REFERÊNCIAS

BULLOCK, D. S.; BOERNGEN, M.; TAO, H.; MAXWELL, B.; LUCK, J. D.; SHIRATSUCHI, L.; PUNTEL, L.; MARTIN, N. F. The data-intensive farm management project: changing agronomic research through on-farm precision experimentation. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 2736-2746, 2019. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0165.

DOERGE, T. Defining management zones for precision farming. **Crop Insights**, v. 8, n. 21, p. 1-5, 1999.

FRED, A. L. N.; JAIN, A. K. Combining multiple clusterings using evidence accumulation. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 27, n. 6, p. 835-850, 2005. DOI: http://doi.org/10.1109/TPAMI.2005.113.

GAVIOLI, A.; SOUZA, E. G.; BAZZI, C. L.; SCHENATTO, K.; BETZEK, N. M. Identification of management zones in precision agriculture: an evaluation of alternative cluster analysis methods. **Biosystems Engineering**, v. 181, p. 86-102, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.02.019.

LANCE, G. N.; WILLIAMS, W. T. A general theory of classificatory sorting strategies: 1. Hierarchical systems. **The Computer Journal**, v. 9, n. 4, p. 373-380, 1967. DOI: http://doi.org/10.1093/comjnl/9.4.373.

SHIRATSUCHI, L. S.; BRIANTE, P.; BRANDAO, Z. N.; BULLOCK, D. S.; SILVA JUNIOR, C. A.; RAMOS JUNIOR, E. U. On-farm precision experimentation with cotton to generate algorithms for site-specific management of nitrogen fertilizers based on airborne imagery. In: ASA, CSSA AND SSSA INTERNATIONAL ANNUAL MEETINGS, 2019, ASA-CSSA-SSSA. **Anais [...]**. 2019.

SPERANZA, E. A. **Mineração de dados espaciais aplicada no delineamento de unidades de gestão diferenciada em agricultura de precisão**. 2017. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

WARD JÚNIOR, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**, v. 58, n. 301, p. 236-244, 1963. DOI: http://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845.

41

Desenvolvimento de modelos para estimativa da produtividade do algodoeiro no estado de Mato Grosso utilizando dados dos satélites EOS Modis

Developing models for cotton yield estimation in Mato Grosso state using data from the EOS MODIS satellite

Carlos Manoel Pedro Vaz[1], Flavio Santos da Silva[2], Daniel Alexandre Botta de Siqueira[3], Eduardo Antonio Speranza[4], Ednaldo José Ferreira[5], Julio Cezar Franchini dos Santos[6], Márcio de Souza[7], Rafael Galbieri[8], Jean Louis Belot[9]

[1] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, carlos.vaz@embrapa.br*
[2] *Estagiário, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, fl_santos02@hotmail.com*
[3] *Estagiário, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, danielbotta46@gmail.com*
[4] *Analista, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, eduardo.speranza@embrapa.br*
[5] *Analista, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, ednaldo.ferreira@embrapa.br*
[6] *Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, julio.franchini@embrapa.br*
[7] *Pesquisador, Instituto Matogrossense do Algodão, Cuiabá (MT), Brasil, marciosouza@imamt.org.br*
[8] *Pesquisador, Instituto Matogrossense do Algodão, Primavera do Leste (MT), Brasil, rafaelgalbieri@imamt.org.br*
[9] *Pesquisador, Instituto Matogrossense do Algodão, Primavera do Leste (MT), Brasil, jeanbelot@imamt.org.br*

RESUMO

Neste trabalho foi estabelecido um procedimento para relacionar a refletância de bandas individuais e de índices de vegetação obtidos de imagens de satélite com a produtividade do algodão visando ao estabelecimento de modelos de estimativa da produtividade em talhões de produção. O estudo foi realizado em 56 talhões de produção comercial do algodão no estado de Mato Grosso, na safra 2015/2016. Para a obtenção dos modelos, os dados necessários foram as datas de semeadura, as coordenadas geográficas e as produtividades dos talhões na safra. Com isso, foram obtidas séries temporais das refletâncias das bandas (infravermelho próximo-NIR, azul, vermelho, verde e infravermelho de ondas curtas-SWIR 1, 2 e 3) dos satélites EOS Modis, assim como de 18 índices de vegetação comumente utilizados, em função de DAS (dias após a semeadura). Os dados foram estratificados em médias quinzenais de DAS e realizadas análises de correlação linear entre as refletâncias e os índices de vegetação com a produtividade e da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE). As melhores correlações com a produtividade foram observadas para a banda espectral NIR e o índice de vegetação EVI (*Enhanced Vegetation Index*). O EVI forneceu o maior coeficiente de determinação (R^2) e menor RMSE, nas faixas quinzenais de 105-120 e 120-135 DAS, com R^2 = 0,81 e 0,79, e RMSE de ajuste do modelo de 29 e 30 arrobas/ha, respectivamente.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; índices de vegetação; algodão; previsão de safra.

ABSTRACT

In this work, a procedure was established to relate the reflectance of individual bands and vegetation indexes assessed from satellite images to cotton yield, aiming to establish yield estimation models for production plot. The study was carried out on 56 plots of commercial cotton production in the state of Mato Grosso during the 2015-2016 harvest. The required data were sowing dates, geographic coordinates and yields of the plots in that harvest. Time series of the spectral bands reflectance (near infrared-NIR, blue, red, green and shortwave infrared-SWIR 1, 2 and 3) of the EOS Modis satellites were obtained, as well as 18 commonly used vegetation indices were obtained as function of DAS (days after sowing). Data were stratified into 15 DAS intervals and linear correlation analyses were carried out between reflectance and vegetation indices with productivity and the root mean square error (RMSE) was determined. The best correlations with yield were observed for the NIR spectral band and the Enhanced Vegetation Index (EVI).. The EVI provided the highest coefficient of determination (R^2) and lowest RMSE, in the fortnightly bands of 105-120 and 120-135 DAS, with R^2=0.81 and 0.79, and RMSE of model fit of 29 and 30 arrobas/ha, respectively.

Keywords: remote sensing; vegetation indexes; cotton; yield forecast.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000004

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto (SR) de áreas agrícolas com o uso de satélites, aeronaves tripuladas, drones ou sensores ativos de dossel possibilita a avaliação do crescimento vegetativo e reprodutivo das plantas, a identificação de deficiências, doenças e pragas, dentre outras aplicações, sendo uma das principais ferramentas da agricultura de precisão para a identificação de variabilidades espaciais e temporais de culturas agrícolas (Yang, 2018).

O SR por imagens de satélite possui a vantagem de cobrir áreas extensas, com resoluções espaciais que podem variar de menos de um metro a centenas de metros, e periodicidade de dias a semanas, com opções de dados gratuitos e pagos, dependendo da instrumentação do satélite e do serviço disponibilizado. O levantamento bibliográfico realizado por Siłuch et al. (2022) mostrou o interesse crescente na utilização de sensoriamento remoto para o estudo e monitoramento de plantas e safras agrícolas, com maior destaque para as culturas de trigo (30% das publicações) e arroz (20%), com trabalhos realizados na Ásia (32%), Europa (28%) e EUA (28%), e a utilização do SR orbital com maior frequência, principalmente dos satélites EOS Aqua e Terra com o sensor Modis (42%), Landsat (12%), AVHRR (10%), Sentinel (8%) e SPOT (5%).

Na cultura do algodão, o SR tem sido utilizado em diversas aplicações, como detecção de áreas de rebrota espontânea (Yadav et al., 2019) e emergência das plântulas com imagens de alta resolução obtidas por veículos aéreos não tripulados – VANT (Feng et al., 2020); na detecção da abertura de capulhos com o uso de imagens obtidas por VANTs ou satélites (Ren et al., 2020); na identificação da fase de maturação do algodoeiro com espectrorradiômetro (Thompson et al., 2019); e na identificação automática de áreas cultivadas com algodão pelo uso de séries temporais de índices de vegetação obtidos por satélites (Picoli et al., 2018; Werner et al., 2020), dentre outras. No entanto, as aplicações mais frequentes estão relacionadas à avaliação da produtividade do algodoeiro utilizando índices de vegetação obtidos por sensores embarcados em satélites, por câmeras multiespectrais em VANTs ou em aviões tripulados, com espectrorradiômetros, sensores ativos de dossel embarcados em maquinários agrícolas ou utilizados manualmente (Ray et al., 1999; He; Mostovoy, 2000; Dalezios et al. 2001; Domenikiotis et al., 2004; Yang et al., 2004; Zarco-Tejada et al., 2005; Yang et al., 2006; Shi et al., 2007; Zhao et al., 2007; Brandão et al., 2014; Huang et al., 2013; Chen et al., 2015; Huang et al., 2016; Johnson, 2016; Liu et al., 2016; Ballester et al., 2017; Lambert et al., 2017; Meng et al., 2017; Baio et al., 2018; Haghverdi et al., 2018; Yeom et al., 2018; Baio et al., 2019; Meng et al., 2019; Ashapure et al., 2020; Feng et al., 2020; Filippi et al., 2020; Oliveira, 2020; Rezník et al., 2020; Meng et al., 2021; Johnson et al., 2021; Prasad et al., 2021; Tripathy et al., 2022).

O algodão é cultivado no Brasil principalmente em sistema de segunda safra, após o cultivo da soja, e em menor proporção como algodão safra, mas essa proporção pode variar significativamente entre estado e região. Os principais estados produtores são Mato Grosso, com 68,1% da produção nacional na safra 2020/2021, Bahia (21,9%), Minas Gerais (2%), Goiás (2%), Maranhão (1,9%) e Mato Grosso do Sul (1,7%), de acordo com o levantamento da Companhia Nacional de Abstecimento (2022). No Mato Grosso, o cultivo do algodão de segunda safra se dá, em geral, entre janeiro e fevereiro e o algodão safra de dezembro a janeiro. O algodão é uma cultura de crescimento indeterminado, manejada como anual, com um ciclo aproximado de 180 dias. Assim, quando cultivado no final ou no início do ano é colhido entre junho e agosto. Nesse cenário, a janela temporal de monitoramento do algodoeiro por imagens de satélite é bastante favorável, permitindo a obtenção de um número significativo de imagens com baixa interferência de nuvens durante boa parte do ciclo de produção (principalmente após o mês de abril ou maio), que é um aspecto fundamental nesse tipo de aplicação. Outra vantagem é o tamanho típico dos talhões de produção comercial, que em média pode variar entre 100 e 200 ha nas áreas de produção do cerrado, o que viabiliza a utilização de imagens de satélites gratuitas com resoluções espaciais de algumas dezenas de metros, como é o caso do Sentinel (pixel de 10 m x 10 m) e Landsat (30 m x 30 m), a algumas centenas de metros como o Modis (250 m x 250 m).

O sensor Modis embarcado nos satélites EOS Terra e Aqua têm sido bastante empregado para o monitoramento de culturas agrícolas (Siłuch et al., 2022) devido ao tempo de revisita (imagens diárias), por estar em operação desde 1999 (Terra) e 2002 (Aqua) e por disponibilizar diversos produtos como dados de refletância diária original e corrigida com redução do efeito de nuvens, composições de oito dias da refletância com correção de nuvem, índices de vegetação com composição de 16 dias com correção de nuvem, dados de albedo, temperatura e área foliar, dentre outros. Sua principal desvantagem é a baixa resolução espacial, que é de 250 m para as bandas no infravermelho próximo (NIR) e vermelho, e 500 m para as bandas no azul, verde e infravermelho de ondas curtas (SWIR).

No entanto, essa resolução é adequada para a realização de trabalhos em uma escala de microbacia, regional, estadual e nacional, e em algumas situações, ao nível de talhões ou unidades de produção agrícola comercial, como é o caso da produção de grãos e fibras no cerrado, onde os talhões de produção comercial típicos são de algumas centenas de hectares.

Este trabalho apresenta um método para o desenvolvimento de modelos matemáticos para a estimativa da produtividade do algodoeiro, utilizando índices de vegetação obtidos pelo sensor Modis embarcado nos satélites EOS Terra e Aqua. O objetivo foi investigar o potencial do uso das refletâncias das diversas bandas do Modis e dos índices de vegetação para estimativa da produtividade do algodoeiro, bem como do melhor momento dessa análise durante o ciclo de produção.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As análises foram realizadas em 56 talhões de produção comercial de algodão das regiões noroeste e médio-norte do estado de Mato Grosso, na safra 2015/2016 (Figura 1), utilizando dados obtidos do levantamento realizado pelo Instituto Matogrossense do Algodão – IMAmt (Galbieri et al., 2016). As informações mínimas necessárias para a obtenção dos modelos a partir das imagens do Modis são as coordenadas geográficas, as datas de semeadura e as produtividades dos talhões. Com as coordenadas geográficas de cada talhão, foram obtidos manualmente os contornos (exemplos na Figura 1b) com a ferramenta de geração de polígonos do Google Earth Pro em arquivos do tipo kml, os quais foram posteriormente convertidos em formato vetorial (*shapefile*) no software QGIS.

A Figura 2 apresenta os histogramas e gráficos em barras com a frequência da produtividade (arrobas/ha), população de plantas (plantas/hectare), teores de argila (%) e fósforo no solo (mg/dm^3), área (hectares) e cultivares utilizadas nos 56 talhões do estudo, a partir da base de dados obtida por Galbieri et al. (2016). O histograma da Figura 2a mostra uma grande variação na produtividade, com talhões de baixas (< 250 arrobas/ha), médias (250 a 300 arrobas/ha) e altas produtividades (> 300 arrobas/ha). A maioria dos solos dos talhões é da classe textural argilosa (Figura 2c). Cerca de 90% das áreas são de algodão safrinha (Figura 2g), com 60% semeado em janeiro/2016 (Figura 2f). A população de plantas predominante foi entre 100 e 140 mil plantas (Figura 2b), com 76% das áreas com espaçamento de linhas de 76 cm e 31% com espaçamento de 90 cm.

As séries temporais dos índices de vegetação e das refletâncias das bandas do sensor Modis foram obtidas pela plataforma *Google Earth Engine* (GEE) por meio de um *script* desenvolvido para processar os dados e gravar os arquivos em formato *csv* para cada talhão (contornos previamente obtidos no *Google Earth Pro* e QGIS), os quais foram posteriormente estruturados em planilha eletrônica, para a geração dos modelos matemáticos relacionando a produtividade com as refletâncias das bandas ou índices de vegetação. Para tanto, foi utilizado o produto MCD43A4.006 (Modis Nadir BRDF – *Adjusted Reflectance*) da coleção Modis, que fornece dados diários, com resolução espacial de 500 m, corrigidos a partir das composições de 16 dias, com seleção dos melhores pixels nesse período. As faixas de comprimento de ondas das bandas espectrais utilizadas pelo sensor Modis são as do vermelho (0,62-0,67 µm), infravermelho próximo-

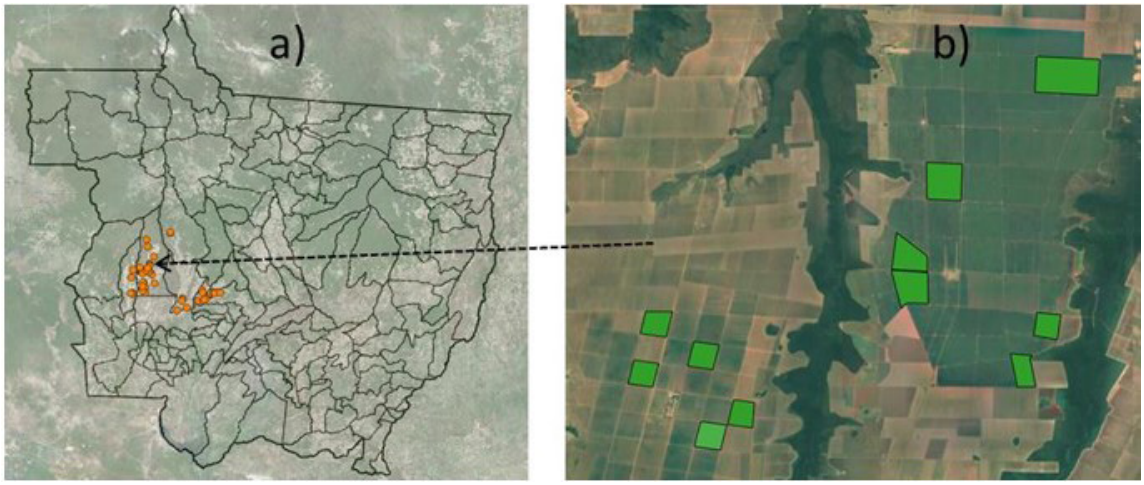


Figura 1. Localização dos 56 talhões de produção de algodão em Mato Grosso (a), nos municípios de Sapezal, Diamantino, Campos de Júlio, Campo Novo dos Parecis e Brasnorte, e dos contornos de 11 talhões no município de Sapezal (b).

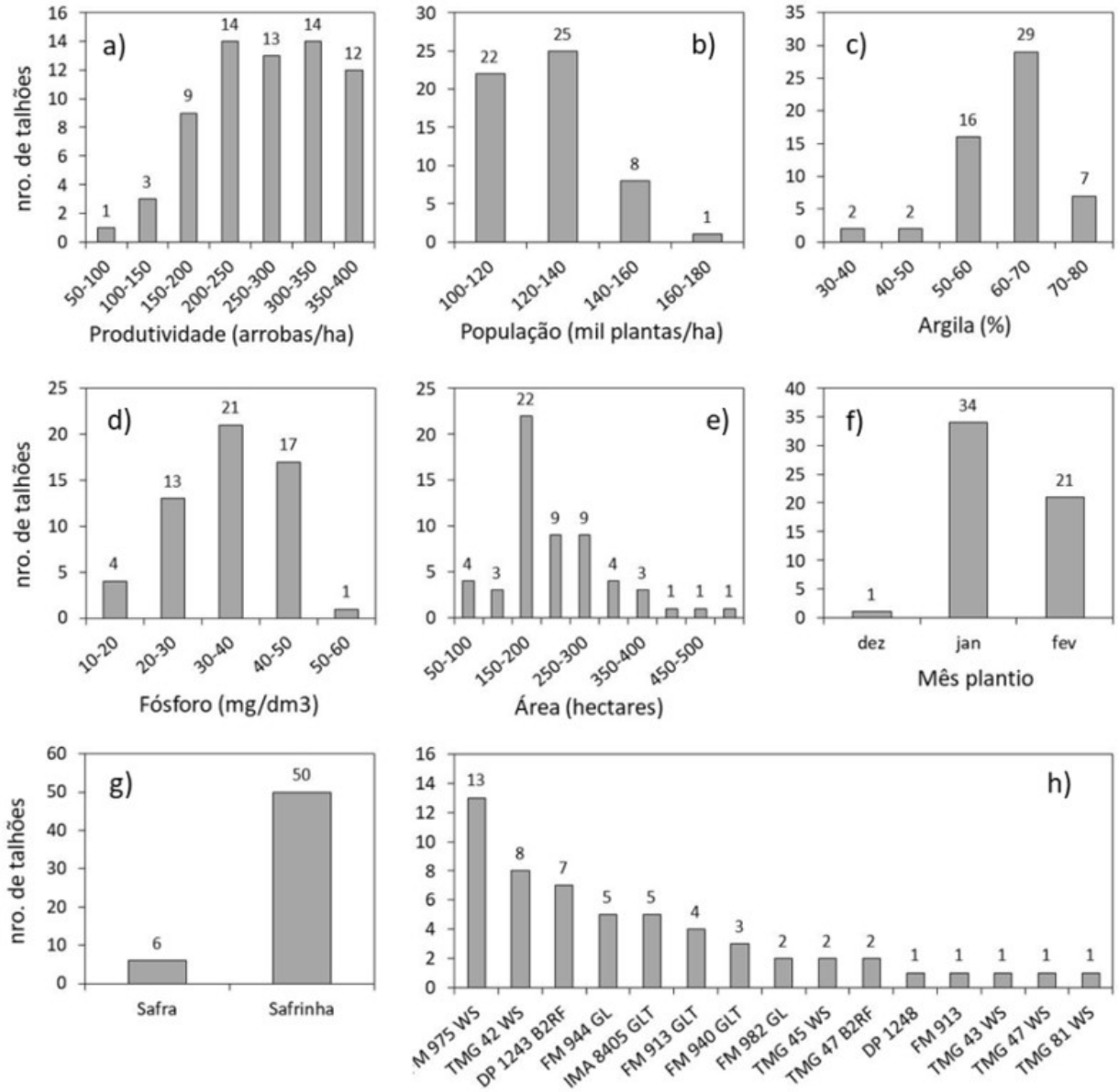


Figura 2. Distribuições de frequência da produtividade (a), população de plantas (b), teor de argila do solo (c), teor de fósforo no solo (d), área dos talhões (e), mês de semeadura (f), tipo de cultivo em safra ou safrinha (g) e cultivares utilizadas (h).

-NIR (0,841-0,876 µm), azul (0,459-0,479 µm), verde (0,545-0,565 µm), infravermelho de ondas curtas-SWIR1 (1,23-1,25 µm), SWIR2 (1,628-1,656 µm) e SWIR3 (2,105-2,155 µm).

Na Tabela 1 são apresentados os índices de vegetação avaliados neste trabalho. A Figura 3 apresenta um exemplo dos dados gerados (séries temporais das refletâncias das bandas e de NDVI em função dos DAS) para um dos 56 talhões, com os dados originais diários (a) e das médias quinzenais (b). Os modelos para a estimativa da produtividade foram gerados correlacionando-se linearmente as reflexões das bandas e os índices de vegetação com a produtividade, para faixas quinzenais de DAS (0-15, 15-30,....165-180). Os melhores modelos foram selecionados considerando-se os maiores coeficientes de determinação (R^2) e os menores erros estimados pela raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE).

3 RESULTADOS

Para visualizar e melhor entender o efeito da produtividade do algodoeiro nas refletâncias das bandas, os talhões foram agrupados em classes de produtividade (< 200, 200-250, 250-300 e > 300 arrobas/ha) e calculadas as médias quinzenais das séries temporais das reflexões das sete bandas do sensor Modis nessas classes (Figura 4). O eixo y (refletância) é apresentado na escala logarítmica, para melhor visualização, pois há grande variação (maior que uma ordem de gran-

Tabela 1. Índices de vegetação avaliados.

Índice	Fórmula	Índice	Fórmula	Índice	Fórmula
NDVI	$\frac{NIR-red}{NIR+red}$	EVI	$\frac{2,5(NIR-red)}{NIR+6red-7,5blue+1}$	NIR/red	$\frac{NIR}{red}$
BNDVI	$\frac{NIR-blue}{NIR+blue}$	S1-R	$\frac{SWIR1-red}{SWIR1+red}$	NIR/blue	$\frac{NIR}{blue}$
GNDVI	$\frac{NIR-green}{NIR+green}$	S1-B	$\frac{SWIR1-blue}{SWIR1+blue}$	NIR/green	$\frac{NIR}{green}$
S1NDVI	$\frac{NIR-SWIR1}{NIR+SWIR1}$	S1-G	$\frac{SWIR1-green}{SWIR1+green}$	NIR/S1	$\frac{NIR}{SWIR1}$
S2NDVI	$\frac{NIR-SWIR2}{NIR+SWIR2}$	S1-S2	$\frac{SWIR1-SWIR2}{SWIR1+SWIR2}$	NIR/S2	$\frac{NIR}{SWIR2}$
S3NDVI	$\frac{NIR-SWIR3}{NIR+SWIR3}$	S1-S3	$\frac{SWIR1-SWIR3}{SWIR1+SWIR3}$	NIR/S3	$\frac{NIR}{SWIR3}$

red: vermelho; NIR: infravermelho próximo; blue: azul; green: verde; SWIR: infravermelho de ondas curtas.

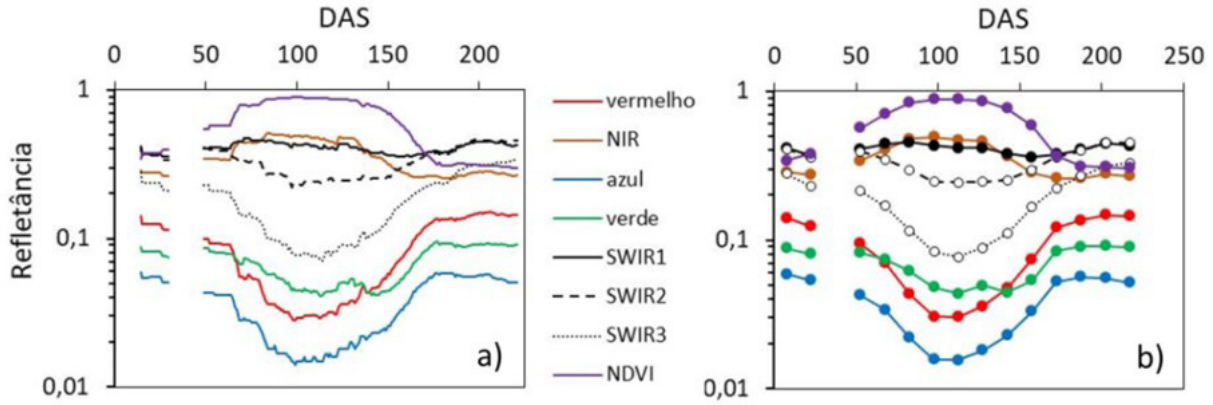


Figura 3. Séries temporais das refletâncias das bandas do vermelho, NIR, azul, verde, SWIR1, SWIR2, SWIR3 e NDVI, obtidas do sensor Modis, com os dados diários (a) e as médias quinzenais (b). DAS: dias após a semeadura.

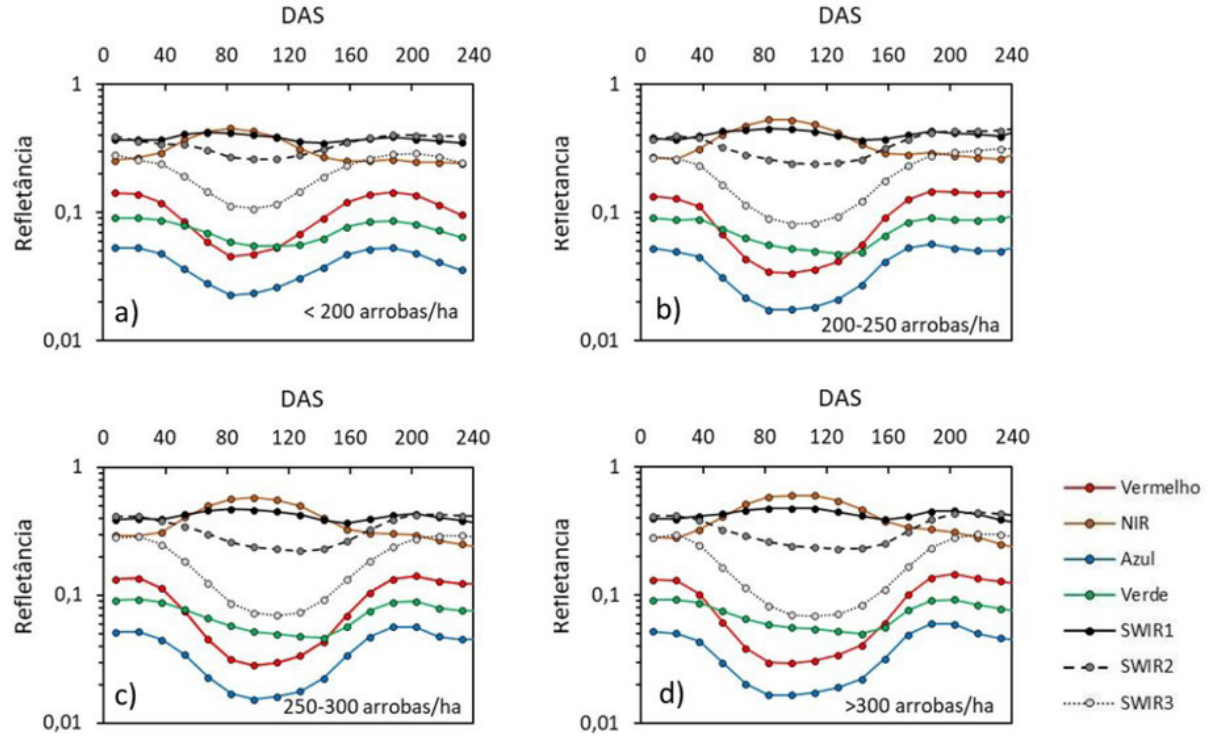


Figura 4. Médias quinzenais das séries temporais das refletâncias das bandas do vermelho, NIR, azul, verde, SWIR1, SWIR2, SWIR3 dos talhões com produtividades < 200 (a), 200-250 (b), 250-300 (c) e > 300 arrobas/ha (d).

deza) entre a menor refletância (banda espectral do azul, em torno de 0,02) e a maior refletância (banda do NIR, em torno de 0,6).

De modo geral, observam-se valores mais baixos de refletância (maior absorção da radiação eletromagnética) para as bandas do azul, vermelho e verde, devido às altas absorções desses comprimentos de onda pelas folhas para o processo de fotossíntese.

A região do espectro eletromagnético entre 0,4 e 0,7 µm (região do visível) é denominada de radiação fotossinteticamente ativa (PAR), devido ao seu uso pelas plantas para a fotossíntese. Apesar da clorofila apresentar a coloração verde (0,5 a 0,565 µm) devido à reflexão dessa radiação, que é observada no pico de sensibilidade do olho humano em 0,56 µm, uma parte significativa da radiação na região de comprimento de onda verde é absorvida pelos pigmentos fotossintéticos, principalmente os carotenoides. Os pigmentos clorofila a e b absorvem luz preferencialmente nas regiões do azul (0,44 a 0,485 µm) e vermelho (0,625 a 0,74 µm), enquanto os carotenoides absorvem nas regiões do azul e verde. As bandas da luz azul e vermelha são absorvidas preferencialmente pelos pigmentos localizados nas camadas mais superficiais das células das folhas e são mais eficientes na fotossíntese nessa região, comparado com a luz verde, que é transmitida para as camadas mais internas das folhas, sendo mais eficiente que a azul e a vermelha na fixação do CO_2 nessa região (Nishio, 2000; Terashima et al., 2009).

A banda espectral do azul apresentou a maior absorção (menor refletância) em todo o ciclo de produção (Figura 4), seguida do vermelho e do verde (entre cerca de 50 a 140 DAS), como esperado, de acordo com os mecanismos de absorção de luz pelos pigmentos fotossintéticos mencionados anteriormente. Com relação às classes de produtividade, verificaram-se os maiores valores de refletância para essas três bandas (azul, verde e vermelho) nas classes de produtividade mais baixas (Figura 4a e 4b), indicando menores absorções da radiação fotossinteticamente ativa, devido às deficiências e estresses abióticos e bióticos possíveis de ocorrer no campo, como deficiências nutricionais, hídricas, térmicas e doenças e pragas, que causam perdas na produção.

As séries temporais das refletâncias das bandas do azul e do vermelho apresentaram comportamentos similares (aproximadamente colineares) ao longo da safra (DAS), com diminuição da refletância (aumento da absorção) até cerca de 90-100 DAS e um aumento a partir daí até a colheita (cerca de 180 DAS). Da mesma forma, a refletância da banda do verde diminui (aumenta a absorção) ao longo do ciclo, mas a uma taxa menor que do azul e do vermelho, até cerca de 130-150 DAS, aumentando a partir daí até a colheita. Essas diferenças das séries temporais do azul e vermelho em comparação com o verde podem ser devido ao processo diferenciado de absorção de luz pelos pigmentos fotossintéticos (Nishio, 2000), combinados com efeitos de crescimento do dossel, surgimento dos botões florais, flores e capulhos, bem como da aplicação de produtos para a desfolha e maturação, que alteram a cor e consequentemente a reflexão da luz pelo dossel do algodoeiro.

Já a série temporal do NIR apresentou comportamento oposto ao das bandas coloridas (Figura 4), com valores de refletância significantemente maiores (baixa absorção) que do azul, vermelho e verde, aumentando até cerca de 90-100 DAS e diminuindo a partir daí até a colheita. Esse ponto de inflexão em 90-100 DAS é similar ao que ocorre com as bandas do azul e vermelho e deve estar relacionado ao fechamento do dossel, ao desenvolvimento dos órgãos reprodutivos, à maturação e senescência. As séries temporais das reflexões das três bandas do SWIR apresentaram comportamentos antagônicos, dependendo do comprimento de onda, sendo a do SWIR1 (1,23 a 1,25 µm) similar à do NIR, a do SWIR2 (1,628 a 1,656 µm) similar à do verde e SWIR3 (2,105 a 2,155 µm) similar às do azul e vermelho.

Na Figura 5 são apresentadas as séries temporais quinzenais médias para cada uma das bandas para as quatro classes de produtividade definidas (< 200, 200-250, 250-300 e > 300 arrobas/ha).

Para as bandas do azul, vermelho, verde, SWIR2 e SWIR3 observou-se uma tendência de diminuição da refletância com o aumento da produtividade a partir dos 50 DAS até a colheita. Entretanto, verificou-se uma saturação dessa diminuição para produtividades maiores que 250 arrobas/ha. Além disso, no caso do verde a diminuição ocorreu apenas após 80 DAS e a tendência de diminuição não foi tão clara como para o azul e vermelho. Para as bandas do NIR e SWIR1 houve aumento da refletância com o aumento da produtividade, praticamente sem saturação para as produtividades mais altas.

Os resultados apresentados nas Figuras 4 e 5 indicam a viabilidade de se utilizar dados da refletância das bandas individualmente e, consequentemente, a combinação delas em índices de vegetação, como os apresentados na Tabela 1, em diferentes fases do ciclo do algodoeiro, para a obtenção de modelos matemáticos entre as refletâncias ou índices de vegetação e a produtividade. A Figura 6 apresenta as relações entre a produtividade do algodoeiro e as refletâncias das bandas do vermelho (a), NIR (b), azul (c),

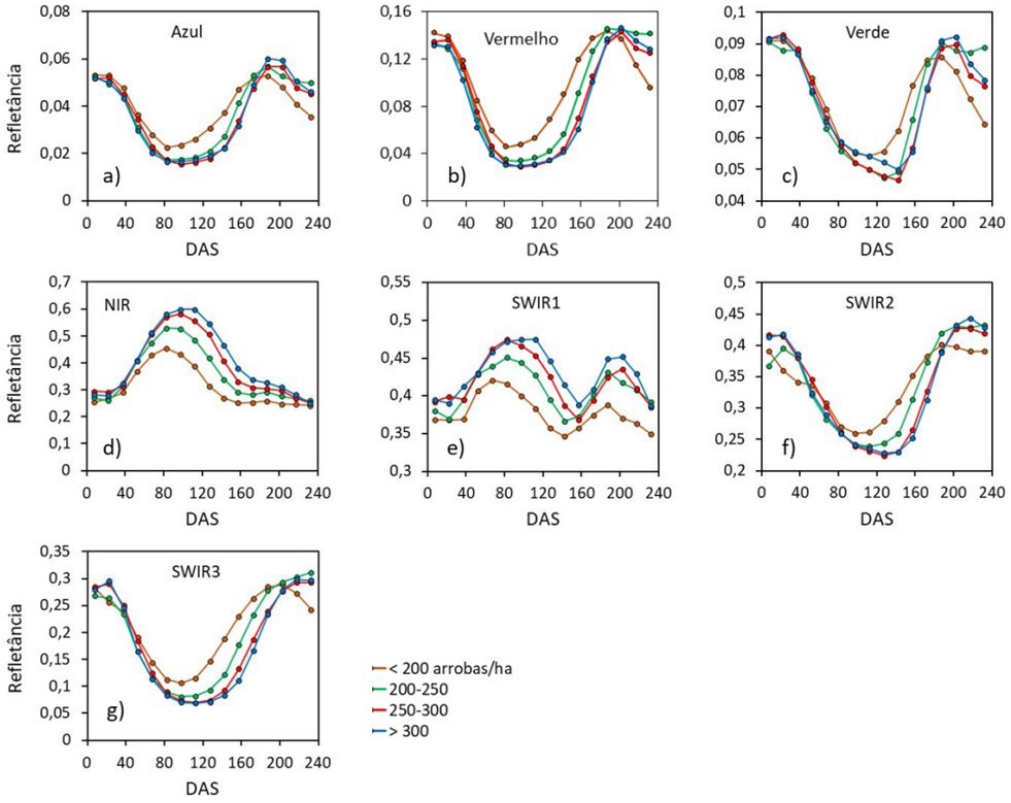


Figura 5. Médias quinzenais das séries temporais das refletâncias das bandas do vermelho (a), NIR (b), azul (c), verde (d), SWIR1 (e), SWIR2 (f) e SWIR3 (g) para conjuntos de talhões de diferentes classes de produtividade (< 200; 200-250; 250-300 e > 300 arrobas/ha).

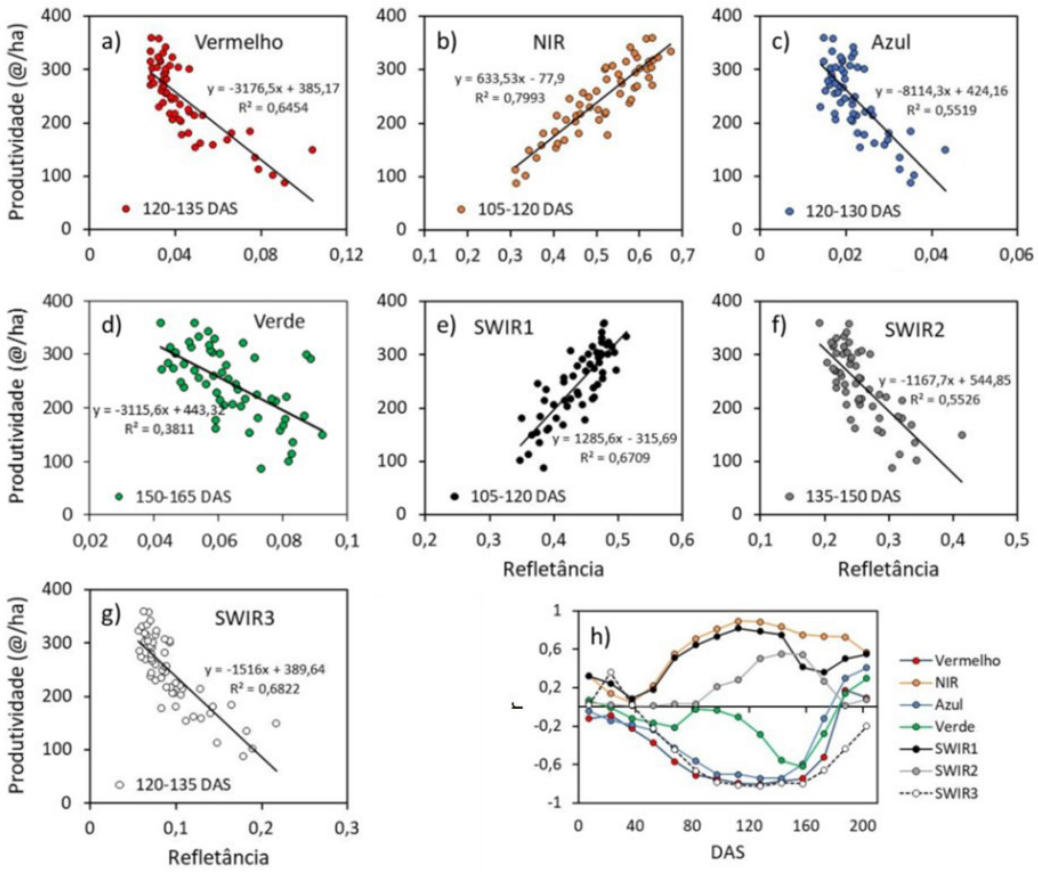


Figura 6. Relações entre a produtividade do algodoeiro e as refletâncias das bandas do vermelho (a), NIR (b), azul (c), verde (d), SWIR1 (e), SWIR2(f) e SWIR3 (g) e a produtividade do algodoeiro. Em h) são apresentadas as variações de r (coeficiente de correlação) com DAS para cada uma das bandas.

verde (d), SWIR1 (e), SWIR2 (f) e SWIR3 (g), para alguns períodos de desenvolvimento das plantas (DAS), com os dados ajustados por meio de regressão linear. Os maiores coeficientes de determinação foram obtidos para as bandas do NIR (R^2=0,799) e SWIR1 (0,671) em 105-120 DAS e vermelho (0,645) e SWIR3 (0,682) em 120-135 DAS.

Na Figura 6 (h) são apresentados os valores de r (coeficiente de correlação linear) para todas as faixas de DAS, da semeadura à colheita, para as sete bandas. Observam-se os maiores valores de r para as bandas do NIR e SWIR1, com correlações positivas, e do vermelho, SWIR3 e azul, com correlações negativas. De modo geral, as melhores correlações foram obtidas para as faixas de 90 a 160 DAS para a maioria das bandas. Já no caso das bandas do verde e SWIR2 os melhores resultados foram obtidos para a faixa de 140 a 160 DAS.

As variações de r com DAS para todos os índices de vegetação avaliados, descritos na Tabela 1, são apresentadas na Figura 7. Os comportamentos em termos de variação com DAS são muito similares entre os índices de vegetação, com as menores correlações no início da safra, até um máximo em torno de 120 DAS, como ocorreu também para as bandas individualmente (Figura 6h).

Os índices de vegetação com os maiores valores de r (EVI, NIR/S1, NIR/red, NIR/S2) são apresentados em d) juntamente com o resultado para a banda do NIR, que apresentou o melhor desempenho entre as bandas individuais, e o NDVI, que é o índice de vegetação mais utilizado na literatura. Entre 60 e 90 DAS o EVI e o NDVI apresentaram os maiores r, mas a partir daí o r do NDVI diminuiu bastante comparado com os demais. Para a faixa de 90 a 150 DAS o EVI apresentou o melhor desempenho, seguido da banda do NIR e dos índices NIR/S1 e NIR/S2.

Para os índices de vegetação e bandas avaliadas os menores erros ocorreram para as faixas de 105-120 e 120-135 DAS e o EVI foi o que apresentou os menores erros para todas as faixas de DAS, conforme verificado também na análise do coeficiente de correlação linear (Figura 7d). Assim, dentre os 18 índices de vegetação e sete bandas espectrais avaliadas, o EVI foi o que apresentou o melhor desempenho como modelo linear de correlação com a produtividade.

Os resultados indicam a possibilidade da estimativa da produtividade do algodoeiro com erro de aproximadamente 30 arrobas/hectare com a medida do EVI pelo sensor Modis a 105-120 DAS (Tabela 2), utilizando os modelos gerados com dados de 56 talhões de produção comercial de algodão em Mato Grosso, na safra 2015/2016. As correlações lineares entre os dados medidos de EVI e da produtividade para diversas faixas de DAS são apresentadas na Figura 8.

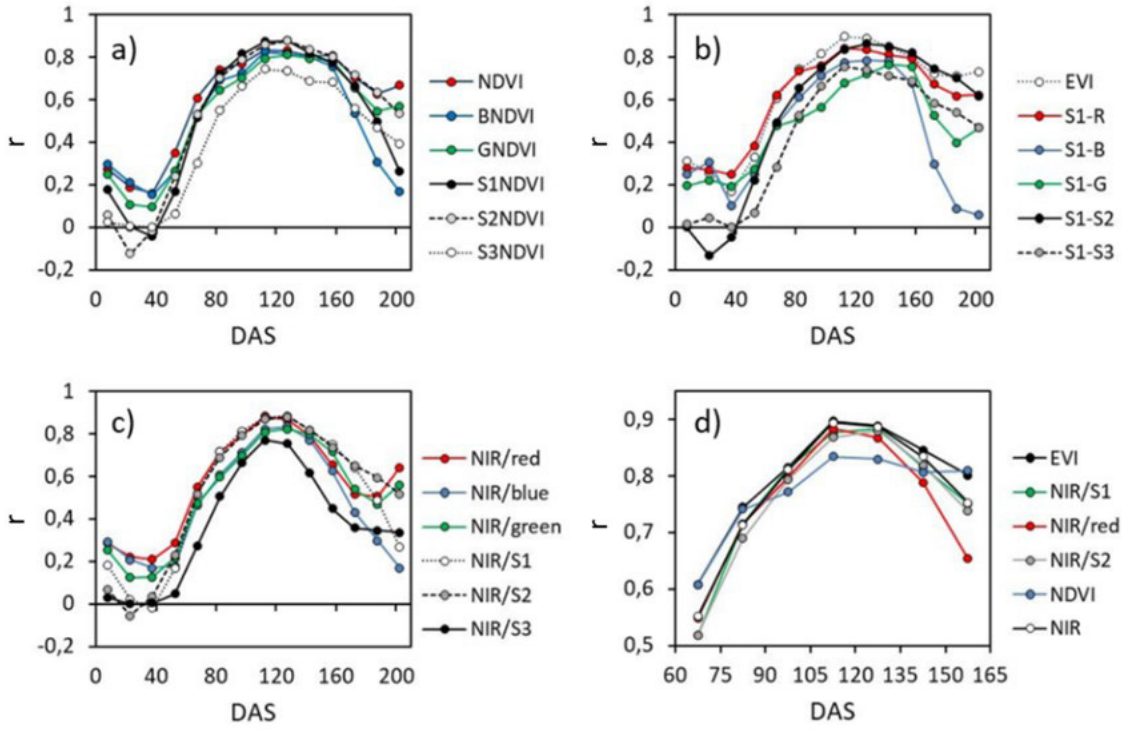


Figura 7. Variação do coeficiente de correlação r em função de dias após a semeadura (DAS) do algodoeiro para todos os índices de vegetação descritos na Tabela 1. Em d) são apresentados os índices com os maiores r (EVI, NIR/S1, NIR/red, NIR/S2), a banda individual com a melhor correlação (NIR) e o índice NDVI.

Tabela 2. Erro da estimativa da produtividade do algodoeiro (RMSE) dos melhores modelos, considerando os índices de vegetação (EVI, NIR/S1, NIR/S2, NDVI) e banda espectral NIR, para cada faixa de DAS. Os menores RMSEs para cada faixa de DAS estão destacados em cinza.

DAS	RMSE (arrobas/ha)				
	EVI	NIR	NIR/S1	NIR/S2	NDVI
45-60	63	65	66	65	62
60-75	53	56	57	57	53
75-90	44	47	47	48	45
90-105	39	39	39	40	42
105-120	29	30	32	33	37
120-135	30	31	31	32	37
135-150	35	37	39	38	39
150-165	40	44	44	45	39
165-180	46	45	45	51	47

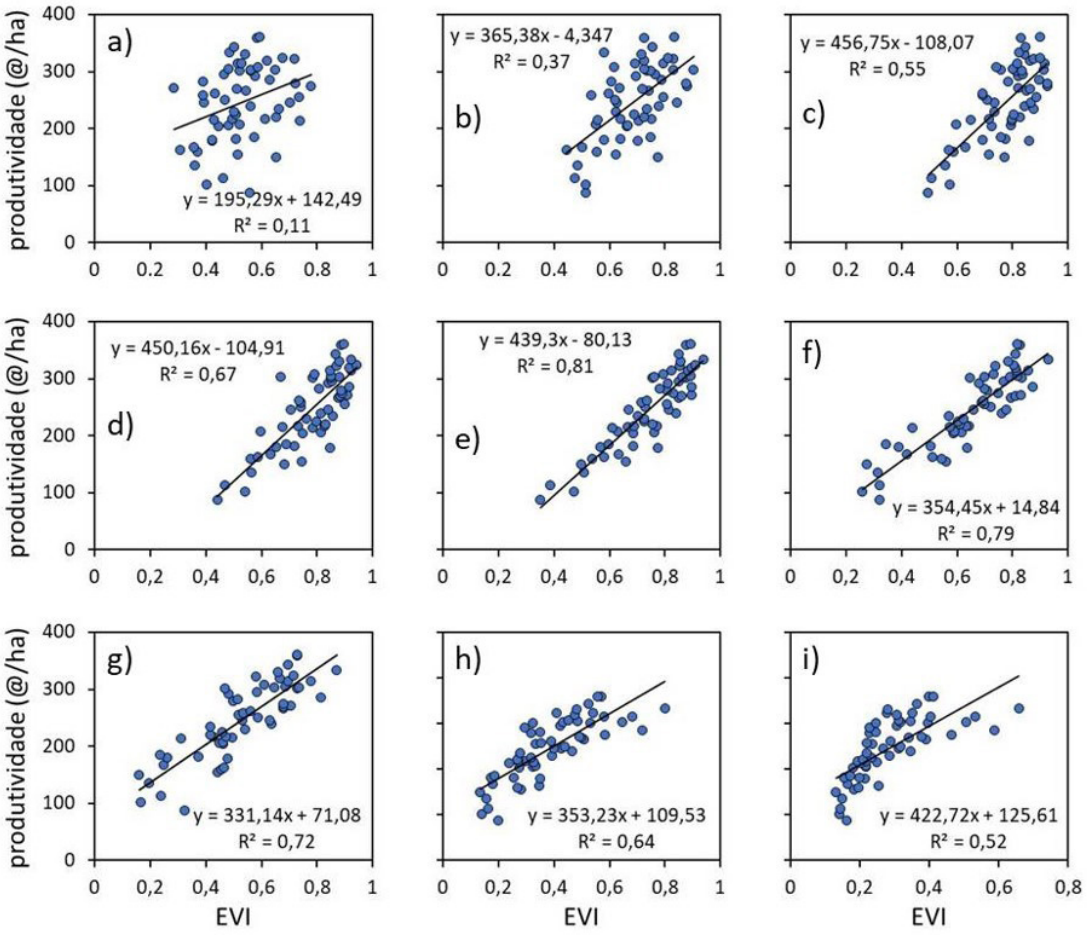


Figura 8. Modelos lineares entre EVI e a produtividade do algodoeiro para 45-60 (a), 60-75 (b), 75-90 (c), 90-105 (d), 105-120 (e), 120-135 (f), 135-150 (g), 150-165 (h) e 165-180 DAS (i).

4 CONCLUSÕES

Foram obtidas correlações lineares fortes e moderadas entre as refletâncias das bandas espectrais do sensor Modis, os índices de vegetação e a produtividade do algodoeiro. As bandas que apresentaram as refletâncias mais fortemente correlacionadas linearmente com a produtividade foram as do NIR, SWIR3, SWIR1 e vermelho. Entre os 18 índices de vegetação avaliados, o EVI apresentou a mais alta correlação com a produtividade, seguido pelo NIR/SWIR1, NIR/red e NIR/SWIR1 (r

= 0,877), todos superiores ao NDVI, que é um dos índices de vegetação mais amplamente utilizados em estudos de sensoriamento remoto de plantas.

Os melhores resultados foram verificados nas faixas de 105-120 e 120-135 DAS para o EVI, com RMSE de aproximadamente 30 arrobas/ha. Os resultados apresentados evidenciam que é possível se estimar a produtividade do algodoeiro com uma acurácia razoável a partir de 75-90 DAS (RMSE = 44 arrobas/ha) até 150-165 DAS (RMSE = 40 arrobas/ha), de acordo com as análises realizadas.

As séries temporais das bandas e índices de vegetação derivados dos dados diários do sensor Modis provaram ser adequadas para desenvolver modelos de estimativa da produtividade do algodoeiro no sistema de produção de Mato Grosso, mesmo com a baixa resolução espacial (pixels de 500 m) do produto utilizado (MCD43A4.006). A estratégia de estratificar as séries temporais em médias quinzenais de DAS mostrou-se eficaz e viável para a construção dos modelos.

Os modelos aqui apresentados foram gerados com talhões de diferentes regiões de Mato Grosso, mas, no entanto, os dados utilizados foram de uma única safra (2015-2016). Assim, é necessária ainda uma validação mais ampla dos modelos gerados, para outras safras e mais recentes, de diferentes regiões e variações climáticas. Adicionalmente, a abordagem metodológica apresentada poderá ser empregada futuramente para o desenvolvimento de modelos de estimativa da produtividade do algodoeiro em outras regiões e estados. A partir disso será possível avaliar a viabilidade do uso de modelos para estimativas gerais ou específicas para cada estado, localidade ou sistema de produção (por exemplo irrigado ou sequeiro, primeira ou segunda safra, cultivares precoces, intermediárias e tardias, etc.).

O procedimento proposto de utilização de séries temporais de imagens de satélite para a estimativa da produtividade é promissor e pode ser aplicado a outras culturas de segunda safra, como milho, sorgo, milheto, dentre outras, bem como de primeira safra (p. ex. soja) e outros satélites com dados abertos (gratuitos) como o Sentinel e o Landsat. No caso desses satélites, que possuem melhores resoluções espaciais (10 m e 30 m, respectivamente) há a possibilidade de se desenvolver modelos que possibilitarão a obtenção de mapas de colheita a partir das imagens dos índices de vegetação.

REFERÊNCIAS

ASHAPURE, A.; JUNG, J.; CHANG, A.; OH, S.; YEOM, J.; MAEDA, M.; MAEDA, A.; DUBE, N.; LANDIVAR, J.; HAGUE, S.; SMITH, W. Developing a machine learning based cotton yield estimation framework using multi-temporal UAS data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 169, p. 180-194, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.09.015.

BAIO, F. H. R.; NEVES, D. C.; SOUZA, H. B.; LEAL, A. J. F.; LEITE, R. C.; MOLIN, J. P.; SILVA, S. P. Variable rate spraying application on cotton using an electronic fow controller. **Precision Agriculture**, v. 19, p. 912-928, 2018. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-018-9564-7.

BAIO, F. H. R.; NEVES, D. C.; TEODORO, P. E. Soil chemical attributes, soil type, and rainfall effects on normalized difference vegetation index and cotton fiber yield variability. **Agronomy Journal**, v. 111, p. 2910-2919, 2019. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj2019.05.0375.

BALLESTER, C.; HORNBUCKLE, J.; BRINKHOFF, J.; SMITH, J.; QUAYLE, W. Assessment of in-season cotton nitrogen status and lint yield prediction from unmanned aerial system imagery. **Remote Sensing**, v. 9, p. 1149, 2017. DOI: http://doi.org/10.3390/rs9111149.

BRANDÃO, Z. N.; GREGO, C. R.; INAMASU, R. Y.; JORGE, L. A. C. Spectral reflectance of satellite images using geostatistics methods to estimate growth and cotton yield. **SPIE - 2014 European Remote Sensing**, v. 923920, 2014.

CHEN, Y.; MEI, X.; LIU, J. Cotton growth monitoring and yield estimation based on assimilation of remote sensing data and crop growth model. **International Conference on Geoinformatics**, v. 23, pp. 1-4, 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABSTECIMENTO. **Série histórica das safras**. 2022. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/898-algodao. Acesso em: 13 set. 2022.

DALEZIOS, N. R.; DOMENIKIOTIS, C.; LOUKAS, A.; TZORTZIOS, S.T.; KALAITZIDIS, C. Cotton yield estimation based on NOAA/AVHkR produced NDVI. **Physics and Chemistry of the Earth, Part B**, v. 26, n. 3, p. 247-251, 2001.

OLIVEIRA, R.F. **Estimativa da produtividade do algodoeiro a partir de índices de vegetação derivados de imagens orbitais de alta resolução espacial**. 2020. 69 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DOMENIKIOTIS, C.; SPILIOTOPOULOS, M.; TSIROS, E.; DALEZIOS, N. R. Early cotton yield assessment by the use of the NOAA/AVHRR derived vegetation condition index (VCI) in Greece. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 14, p. 2807-2819, 2004. DOI: http://doi.org/10.1080/01431160310001632729.

FENG, A.; ZHOU, J.; VORIES, E.; SUDDUTH, K. A. Evaluation of cotton emergence using UAV-based narrow-band spectral imagery with customized image alignment and stitching algorithms. **Remote Sensing**, v. 12, n. 11, p. 1764, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/rs12111764.

FILIPPI, P.; WHELAN, B.M.; VERVOORT, R. W.; BISHOP, T. F. A. Mid-season empirical cotton yield forecasts at fine resolutions using large yield mapping datasets and diverse spatial covariates. **Agricultural Systems**,

v. 184, p. 102894, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102894.

GALBIERI, R.; VAZ, C. M. P.; SILVA, J. F. V.; AMUS, G. L. A.; CRESTANA, S.; MATOS, E. S.; MAGALHAES, C. A. S. Influência dos parâmetros do solo na ocorrência de fitonematoides. In: GALBIERI, R.; BELOT, J. L. (org.). **Nematoides fitoparasitas do algodoeiro nos cerrados brasileiros:** biologia e medidas de controle. Cuiabá: IMAmt, 2016. p. 37-90.

HAGHVERDI, A.; WASHINGTON-ALLEN, R. A.; LEIB, B. G. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 152, p. 186-197, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2018.07.021.

HE, L.; MOSTOVOY, G. Cotton yield estimate using Sentinel-2 data and an ecosystem model over the Southern US. **Remote Sensing**, 2019, v. 11, 2000. DOI: http://doi.org/10.3390/rs11172000.

HUANG, Y.; BRAND, Y. H. J.; SUI, R.; THOMSON, R. S. J.; FURUKAWA, T.; EBELHAR, M. W. Cotton yield estimation using very high-resolution digital images acquired with a low-cost small unmanned aerial vehicle. **Transactions of the ASABE**, v. 59, n. 6, p. 1563-1574, 2016. DOI: http://doi.org/10.13031/trans.59.11831.

HUANG, Y., SUI, R., THOMSON, S. J., FISHER, D. K. Estimation of cotton yield with varied irrigation and nitrogen treatments using aerial multispectral imagery. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 6, n. 2, p. 37-41, 2013.

JOHNSON, D. M. A comprehensive assessment of the correlations between field crop yields and commonly used MODIS products. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 52, p. 65-81, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jag.2016.05.010.

JOHNSON, D. M., ROSALES, A., MUELLER, R., REYNOLDS, C., FRANTZ, R., ANYAMBA, A., PAK, E., TUCKER, C. USA Crop yield estimation with MODIS NDVI: Are remotely sensed models better than simple trend analyses? **Remote Sensing**, v. 13, p. 4227, 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/rs13214227.

LAMBERT, M. J.; BLAES, X.; TRAORE, P. S.; DEFOURNY, P. Estimate yield at parcel level from S2 time serie in sub-Saharan smallholder farming systems. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE ANALYSIS OF MULTITEMPORAL REMOTE SENSING IMAGES (MULTITEMP), 9., 2017, Bruges. **Proceedings [..]**. Bruges: IEEE, 2017. pp. 1-7. DOI: http://doi.org/10.1109/Multi-Temp.2017.8035204.

LIU, Q.; LI, X. Y.; LIU, G. H.; HUANG, C.; GUO, Y. S. Cotton area and yield estimation at Zhanhua county of China using HJ-1 EVI time series. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION TECHNOLOGY AND APPLICATIONS (ITA 2016), 3., 2016, Hangzhou. **Proceedings [...]**. Hangzhou: ITA, 2016. DOI: http://doi.org/10.1051/itmconf/20160709001.

MENG, L.; LIU, H.; USTIN, S. L.; ZHANG, X. Assessment of FSDAF accuracy on cotton yield estimation using different MODIS products and Landsat based on the mixed degree index with different surroundings. **Sensors**, v. 21, p. 5184, 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/s21155184.

MENG, L.; LIU, H.; ZHANG, X.; REN, C.; USTIN, S.; QIU, Z.; XU, M.; GUO, D. Assessment of the effectiveness of spatiotemporal fusion of multi-source satellite images for cotton yield estimation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, p. 44-52, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.001.

MENG, L.; ZHANG, X. L.; LIU, H.; GUO, D.; YAN, Y.; QIN, L.; PAN, Y. Estimation of cotton yield using the reconstructed time-series vegetation index of Landsat data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 43, n. 3, p. 244-255, 2017. DOI: http://doi.org/10.1080/07038992.2017.1317206.

NISHIO, J. N. Why are higher plants green? Evolution of the higher plant photosynthetic pigment complement. **Plant Cell and Environment**, v. 23, n. 6, p. 539-548, 2000. DOI: http://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00563.x.

PICOLI, M. C. A.; CAMARA, G.; SANCHES, I.; SIMÕES, R. R.; CARVALHO, A.; MACIEL, A.; COUTINHO, A.; ESQUERDO, J.; ANTUNES, J.; BEGOTTI, R. A.; ARVOR, D.; ALMEID, C. Big earth observation time series analysis for monitoring Brazilian agriculture. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 145, p. 328-339, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.08.007.

PRASAD, N. R.; PATEL, N. R.; DANODIA, A. A. Crop yield prediction in cotton for regional level using random forest approach. **Spatial Information Research**, v. 29, n. 2, p. 195-206, 2021. DOI: http://doi.org/10.1007/s41324-020-00346-6.

RAY, S. S.; POKHARNA, S. S.; AJAI. Cotton yield estimation using agrometeorological model and satellite-derived spectral profile. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 14, p. 2693-2702, 1999. DOI: http://doi.org/10.1080/014311699211741.

REN, Y.; MENG, Y.; HUANG, W.; YE, H.; HAN, Y.; KONG, W.; ZHOU, X.; CUI, B.; XING, N.; GUO, A.; GENG, Y. **Remote Sensing**, v. 12, p. 1712, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/rs12111712.

REZNÍK, T.; PAVELKA, T.; HERMAN, L.; LUKAS, V.; SIRUCEK, P.; LEITGEB, S.; LEITNER, F. Prediction of yield productivity zones from Landsat 8 and Sentinel-2A/B and their evaluation using farm machinery measurements. **Remote Sensing**, v. 12, p. 1917, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/rs12121917.

SHI, Z.; RUECKER, G. R.; MUELLER, M.; CONRAD, C.; IBRAGIMOV, N.; LAMERS, J. P. A.; MARTIUS, C.; STRUNZ, G.; DECH, S.; VLEK, P. L. G. Multitemporal remote sensing and minimum field data. **Agronomy Journal**, v. 99, p. 1317-1326, 2007. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj2006.0260.

SIŁUCH, M.; BARTMINSKI, P.; ZGŁOBICKI, W. Remote sensing in studies of the growing season: a bibliometric analysis. **Remote Sensing**, v. 14, p. 1331, 2022. DOI: http://doi.org/10.3390/rs14061331.

TERASHIMA, I.; FUJITA, T.; INOUE, T.; CHOW, W. S.; OGUCHI, R. Green light drives leaf photosynthesis more efficien-

tly than red light in strong white light: revisiting the enigmatic question of why leaves are green. **Plant and Cell Physiology**, v. 50, n. 4, p. 684-697, 2009. DOI: http://doi.org/10.1093/pcp/pcp034.

THOMPSON, C. N.; GUO, W.; SHARMA, B.; RITCHIE, G. L. Using normalized difference red edge index to assess maturity in cotton. **Crop Science**, v. 59, p. 2167-2177, 2019. DOI: http://doi.org/10.2135/cropsci2019.04.0227.

TRIPATHY, R.; CHAUDHARI, K. N.; BAIRAGI, G. D.; PAL, O.; DAS, R.; BHATTACHARYA, B. K. Towards fine-scale yield prediction of three major crops of India using data from multiple satellite. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 50, n. 2, p. 271-284, 2022. DOI: http://doi.org/10.1007/s12524-021-01361-2.

WERNER, J. P. S.; OLIVEIRA, S. R. M.; ESQUERDO, J. C. D. M. Mapping cotton fields using data mining and MODIS time-series. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 7, p. 2457-2476, 2020. DOI: http://doi.org/10.1080/01431161.2019.1693072.

YADAV, P. K.; THOMASSON, J. A.; ENCISO, J.; SAMANTA, S.; SHRESTHA, A. Assessment of different image enhancement and classification techniques in detection of volunteer cotton using UAV remote sensing. In: AUTONOMOUS AIR AND GROUND SENSING SYSTEMS FOR AGRICULTURAL OPTIMIZATION AND PHENOTYPING, IV., 2019, Washington. **Proceedings [...]**. Washington: SPIE, 2019.

YANG, C. High resolution satellite imaging sensors for precision agriculture. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 5, n. 4, p. 393-405, 2018. DOI: http://doi.org/10.15302/J-FASE-2018226.

YANG, C.; EVERITT, J. H.; BRADFORD, J. M. Airborne Hyperspectral imagery and yield monitor data for mapping cotton yield variability. **Precision Agriculture**, v. 5, p. 445-461, 2004. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-004-5319-8.

YANG, C.; EVERITT, J. H.; BRADFORD, J. M. Evaluating high-resolution quickbird satellite imagery for estimating cotton yield. **Transactions of the ASABE**, v. 49, n. 5, p. 1599-1606, 2006. DOI: http://doi.org/10.13031/2013.22034.

YEOM, J.; JUNG, J.; CHANG, A.; MAEDA, M.; LANDIVAR, J. Automated open cotton boll detection for yield estimation using unmanned aircraft vehicle (UAV) data. **Remote Sensing**, v. 10, p. 1895, 2018. DOI: http://doi.org/10.3390/rs10121895.

ZARCO-TEJADA, P. J.; USTIN, S. L.; WHITING, M. L. Temporal and spatial relationships between within--field yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery. **Agronomy Journal**, v. 97, p. 641-653, 2005. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj2003.0257.

ZHAO, D.; REDDY, K. R.; KAKANI, V. G.; READ, J. J.; SAILAJA KOTI, S. Canopy reflectance in cotton for growth assessment and lint yield prediction. **European Journal of Agronomy**, v. 26, p. 335-344, 2007. http://doi.org/10.1016/j.eja.2006.12.001.

42

Modelo para indicação de adubação nitrogenada em cobertura na cultura do milho utilizando sensor de vegetação

Model for indicating nitrogen fertilizer top-dressing on maize using vegetation sensor

André Luis Vian[1], Christian Bredemeier[2], Maicon Andreo Drum[3], Isabela Seffrin Rodrigues[4], Thaís Martins Mariano[5], Elisa Maria Befert[6]

[1] *Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, andre.vian@ufrgs.br*

[2] *Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, bredemeier@ufrgs.br*

[3] *Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, maicon.andreo@hotmail.com*

[4] *Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, isabelarseffrin@gmail.com*

[5] *Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, tmartinsmariano@gmail.com*

[6] *Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, elisaberft56@gmail.com*

RESUMO

Os métodos tradicionalmente utilizados para indicação de dose de nitrogênio (N) para as culturas de milho são, na maioria das vezes, ineficientes, pois não levam em consideração a variabilidade espacial de solo existente na área. A Agricultura de Precisão (AP) tem como ferramenta os sensores de vegetação, que são um método que surgiu como alternativa para estimativa do potencial produtivo das culturas e realização de aplicações de fertilizantes nitrogenados a taxa variada. Para que a técnica seja aplicada com conformidade, o desenvolvimento de novos algoritmos para tais condições faz-se necessário, a fim de que as adubações nitrogenadas em cobertura, em tempo real, e a taxa variável para as culturas do milho resultem em elevação do rendimento de grãos e incremento na eficiência de uso do N. Os objetivos foram desenvolver e adaptar algoritmos para adubação nitrogenada em cobertura em taxa variada, utilizando sensores ópticos de dossel para a cultura milho na região Sul do Brasil. Para o desenvolvimento, os dados foram submetidos à análise de variância ANOVA pelo Teste F, análise de regressão entre os valores de NDVI, análise entre o rendimento obtido pelos diferentes métodos de adubação (Padrão e Algoritmo) para a comparação de médias pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Palavras-chave: NDVI; GreenSeeker; fertilizantes nitrogenados; adubação de precisão.

ABSTRACT

The methods traditionally used to recommend nitrogen (N) top-dressing on maize are, in most cases, inefficient because they do not take into account the spatial variability of soil existing in the area. Precision Agriculture (PA) is a powerful tool to focus on vegetation sensors, which are a method that has emerged as an alternative to estimate the productive potential of crops and perform nitrogen fertilizer applications at a varied rate. For the technique to be applied with conformity, the development of new algorithms for such conditions is necessary, aiming that nitrogen fertilizer top-dressing can help achieve goals in real time and at variable rate on maize crops, and may result in an increase in grain yield and in the efficiency of N use. The objectives were to develop and adapt algorithms for variable-rate nitrogen fertilization top-dressing, using optical canopy sensors, for maize crops in the southern region of Brazil. For the development, the data were submitted to analysis of variance (ANOVA) by F test, regression analysis between Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) values, analysis between the yield obtained by different fertilization methods (STANDARD and algorithm) for comparison of means by Tukey's test at 5% significance level.

Keywords: NDVI; GreenSeeker; nitrogen fertilization; Precision Fertilization.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000007

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

A indicação de adubação de nitrogênio (N) tem relação direta com o crescimento e o desenvolvimento das plantas, desempenhando importantes funções bioquímicas e fisiológicas no metabolismo vegetal. O efeito desta relação é influenciado pelas formas nas quais o N está disponível no solo (amônio – NH_4^+ ou nitrato – NO_3^-). Essa variação na absorção sofre influência das condições meteorológicas (temperatura, pH do solo, umidade, tipo de solo e atividade microbiana) e do sistema de preparo do solo, as quais influenciam a mineralização da matéria orgânica para NH_4^+ e, posteriormente, a nitrificação para – NO_3^- (Zhu et al., 2015). Contudo, a eficiência na absorção dessas formas minerais é baixa, sendo que a absorção do N aplicado varia entre 50% e 70% do total disponibilizado pela adubação (Saiz Fernández et al., 2015).

Apesar da sua importância fisiológica, em regiões tropicais e subtropicais, devido ao grande número de reações que o N sofre no ambiente e à sua mobilidade no solo sob Sistema Plantio Direto (SPD) e na planta, reduzindo a sua eficiência, o N é um dos nutrientes mais difíceis de serem manejados eficientemente na agricultura (Ernani, 2003; Amaral et al., 2015). Devido a isso, a adubação nitrogenada necessita ser manejada da maneira mais eficiente e sustentável do que verificado atualmente em muitas situações de lavoura, pela utilização de doses condizentes com as reais necessidades da planta no momento da aplicação. Assim, o uso de fontes adequadas desse nutriente, pela aplicação nos estádios de desenvolvimento das plantas com maior necessidade ou resposta ao fertilizante e no local correto, podem variar a quantidade de fertilizante nitrogenado ofertado de acordo com a necessidade das plantas (adubação em dose variada) (Fixen, 2010; Sangoi et al., 2015; Bredemeier et al., 2016).

A indicação de nitrogênio para as culturas do milho para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina é definida a partir de três fatores: teor de matéria orgânica no solo, cultura antecessora (gramíneas, leguminosas ou brassicáceas) e a expectativa de rendimento de grãos esperada para a cultura. Os principais problemas encontrados por essa metodologia de indicação referem-se à dose a ser indicada, que é definida no escritório, sem levar em consideração a variabilidade espacial de solo existente na área.

Dessa forma, os sensores de vegetação possibilitam avaliar a demanda nutricional ao longo do ciclo. A agricultura tradicionalmente realizada no Brasil possui entendimento de que uma lavoura ou talhão apresenta comportamento homogêneo, sendo seu manejo realizado em função da necessidade média para a aplicação dos insumos (fertilizantes na semeadura e nas aplicações em cobertura, defensivos agrícolas, água, calcário), fazendo com que a mesma formulação e/ou quantidade do insumo seja utilizada em toda a área, desconsiderando as necessidades específicas das subáreas (zonas) da lavoura que apresentam características diferentes e possibilidade de resposta diferente à aplicação de N. Diante desse cenário, na tentativa de manejar a variabilidade e aumentar a eficiência do uso dos fertilizantes de maneira sustentável, surgiu a Agricultura de Precisão (AP). O entendimento da variabilidade da lavoura permitiu gerenciá-la, ou seja, por meio do aumento da coleta de informações da área, foi possível ter maior precisão na tomada de decisão sobre as intervenções a serem realizadas.

Dentre as ferramentas utilizadas, destacam-se as que usam os sensores de vegetação para estimativa do potencial produtivo das culturas e realização de aplicações de fertilizantes nitrogenados a taxa variada. Dessa forma, é possível estimar o estado nutricional das plantas durante o ciclo de desenvolvimento e fazer a aplicação, variando a dose de N em tempo real, possibilitando maior eficiência do uso do fertilizante e aumento do potencial produtivo das culturas (Schmidt et al., 2011; Beche et al., 2014). Por meio desses sensores, iniciaram-se os estudos que possibilitaram o entendimento das necessidades nutricionais das plantas em tempo real e a aplicação de N a taxa variável nas lavouras, levando em consideração a variabilidade espacial (Erdle et al., 2011).

Nesse intuito, o desenvolvimento de novos algoritmos para tais condições faz-se necessário, para que as adubações nitrogenadas em cobertura, em tempo real, e a taxa variável para as culturas do milho e do trigo resultem em elevação do rendimento de grãos e incremento na eficiência de uso do N (Povh et al., 2008). O desenvolvimento de algoritmos para a adubação nitrogenada em cobertura em cereais torna-se uma necessidade por causa de todas as interações do fertilizante nitrogenado com o sistema de manejo do solo, as culturas antecessoras e o ambiente, dificultando a estimativa do potencial produtivo das culturas (Welsh et al., 2003; Vian, 2015).

Os objetivos deste trabalho foram desenvolver e adaptar algoritmos para adubação nitrogenada em cobertura e em taxa variada, utilizando sensores ópticos de dossel para a cultura do milho.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho de campo foi conduzido na Estação Experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS) em três safras agrícolas (2017/2018,

2018/2019 e 2019/2020). A EEA/UFRGS localiza-se no município de Eldorado do Sul (RS), na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul (RS). O clima é subtropical de verão úmido quente, do tipo Cfa, conforme a classificação de Koppen (IPAGRO, 1979), com altitude média de 46 metros acima do nível do mar. A precipitação pluvial média anual em Eldorado do Sul é de 1.440 mm e a temperatura média mensal do ar varia entre 14°C e 25°C, entre os meses mais frios e mais quentes (Bergamaschi et al., 2003). O solo da área experimental pertence à unidade de mapeamento São Jerônimo, caracterizado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Streck et al., 2008). Os tratamentos foram alocados no delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos receberam adubação de cobertura no estádio V8 (oito folhas completamente expandidas) (Ritchie et al., 1993).

Com o intuito de gerar uma variabilidade no desenvolvimento de plantas e para calibrar o algoritmo, foram utilizados oito tratamentos com doses de nitrogênio variada (Tabela 1). O tratamento "Padrão" foi baseado na indicação de adubação preconizada pelo Manual de Calagem e Adubação para RS e SC (Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2016). Este tratamento consistiu na aplicação de 30 kg N ha^{-1} na semeadura (formulação – N-P_2O_5-K_2O) e mais a dose indicada pelo Manual de Adubação e Calagem para RS e SC (75 kg de N ha^{-1}), posteriormente, uma aplicação de N em cobertura, no estádio V8 (245 kg N ha^{-1}), totalizando dose total de 350 kg N ha^{-1}, considerando expectativa de rendimento de grãos de 18.000 kg ha^{-1}, considerando a análise de solo.

Tabela 1. Denominação dos tratamentos e doses de adubação aplicado em V2 (duas folhas completamente expandidas) e em V8 (duas folhas completamente expandidas) para a produção da variabilidade no desenvolvimento inicial das plantas.

Tratamento	Dose em V2 (kg ha^{-1})	Dose em V8 (kg ha^{-1})
		Usando o algoritmo
		Média de todas as safras
Testemunha	0	0
0	0	337
25	25	308
50	50	305
75	75	258
100	100	238
150	150	248
Padrão	150	200

No estádio vegetativo V8, foi realizada a adubação nitrogenada em cobertura, utilizando o método do Índice de Suficiência de Nitrogênio (ISN). O ISN foi obtido pela relação dos valores do NDVI dos tratamentos (0, 25, 50, 75, 100, 150 kg N ha^{-1}) dividido pelos valores dos índices de vegetação da faixa padrão (tratamento sem deficiência de nitrogênio). Os valores de ISN foram inseridos na fórmula do modelo calculado pelo ISN, visando à realização da adubação de cobertura a taxa variável. Dessa forma, o algoritmo proposto foi desenvolvido com base nesses dados, promovendo uma melhor redistribuição do N em V8 em tempo real e a taxa variável.

Na condução dos experimentos foram utilizados dois híbridos, sendo na safra agrícola 2017/2018 (Morgan 30A77PW) e nas safras agrícolas 2018/2019 e 2019/2020 (DKB 290), utilizando-se uma densidade populacional de 9 plantas m^{-2}. As semeaduras foram realizadas entre a última semana de outubro e a primeira semana de novembro. As parcelas experimentais foram constituídas de cinco linhas de semeadura com seis metros de comprimento, com espaçamento de 0,5 m, totalizando uma unidade experimental de 15 m^2. O experimento foi conduzido com irrigação de aspersão, quando necessário.

As medições da reflectância do dossel vegetativo foram realizadas com sensor óptico ativo GreenSeeker®, sendo estimado o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). As leituras foram realizadas com o equipamento posicionado paralelamente às linhas da cultura, com 0,6 m a 0,8 m acima do dossel, sendo avaliadas as linhas centrais das parcelas. O NDVI foi calculado utilizando a seguinte fórmula: NDVI = (IVP-V)/(IVP+V). Em que V refere-se à reflectância no vermelho (680 nm) e IVP refere-se ao infravermelho próximo (770 nm).

O rendimento de grãos foi avaliado pela colheita da área útil da parcela, constituída de quatro linhas centrais e com seis metros de comprimento, totalizando 12 m^2. Após a trilha, a massa de grãos de cada parcela foi pesada e corrigida para a umidade de 130 g kg^{-1}, sendo o valor extrapolado para kg ha^{-1}.

Os dados foram submetidos à análise de variância ANOVA pelo Teste F, com auxílio do pacote estatístico SAS™. Posteriormente, análise de regressão entre os valores de NDVI e dos métodos de adubação com o rendimento de biomassa e o rendimento de grãos. Outra análise realizada, quando houve significância na ANOVA entre o rendimento obtido pelos diferentes métodos de adubação (Padrão e Algoritmo), foi a comparação de médias pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

3 RESULTADOS

As aplicações de N na base foram eficientes em provocar variabilidade espacial no desenvolvimento inicial da cultura do milho, como apresentado na Figura 1. Observa-se que, na média das três safras agrícolas estudadas, a resposta que o NDVI apresentou variabilidade no desenvolvimento das plantas, indicou dessa forma que houve diferença significativa no crescimento e desenvolvimento das plantas até o estágio V8 (momento da adubação de cobertura), confirmando o efeito dos tratamentos aplicados no início do cultivo.

Verificou-se que ao longo das três safras houve relação entre os tratamentos mesmo com a utilização de dois híbridos diferentes, ajustando-se uma curva quadrática com um R^2=0,98 e que, devido ao aumento das doses de N aplicadas no início do desenvolvimento, obtém-se um "platô" nas maiores doses de N (150 NDVI e Padrão). Ressalta-se que, mesmo com o efeito de ano de produção e com diferentes híbridos, o NDVI apresentou-se estável e corrobora como um ótimo índice de vegetação.

De posse dos dados de NDVI, onde se encontrou a variabilidade espacial do desenvolvimento das plantas desejada para que se pudesse realizar a aplicação do algoritmo desenvolvido, utilizou-se o índice de suficiência de nitrogênio (ISN). A construção do ISN se deu a partir da divisão dos valores de NDVI de cada parcela dos tratamentos pelo NDVI (0 NDVI, 25 NDVI, 50 NDVI, 75 NDVI, 100 NDVI e 150 NDVI) do tratamento Padrão (indicado pelo manual de calagem e adubação). Assim, pôde-se detectar a demanda nutricional da cultura do milho. O valor considerado sem demanda nutricional ou com ótima nutrição é o valor de 1,0, e os valores abaixo de 1,0 significam que a demanda nutricional é maior.

Verificou-se que ao longo das três safras houve relação entre a demanda por fertilizante, ajustando-se uma curva quadrática com um R^2=0,99 e que, devido ao aumento das doses de N aplicadas no início do desenvolvimento, obtém-se um "platô" nas maiores doses de N (150 NDVI e Padrão). Ressalta-se que, mesmo com o efeito de ano de produção e com diferentes híbridos o ISN, apresentou-se estável, sendo possível a utilização para definição da dose a ser indicada pelo algoritmo. Ressalta-se que o coeficiente de variação do ISN ao longo das safras foi muito baixo, semelhante ao encontrado para o NDVI.

Observou-se que na utilização do modelo de indicação de adubação nitrogenada em cobertura, o algoritmo usado promoveu uma redistribuição da dose de N no ambiente de produção quando comparado ao método tradicional de adubação. A variação na distribuição das doses de N indicada variou entre 340 e 240 kg N ha^{-1} (Figura 2). Os menores ISN foram os que receberam as maiores doses, e os maiores ISN foram os que receberam as menores doses indicadas. Verificou-se para essa variável que o coeficiente de variação foi maior em relação às demais variáveis, sendo de 30%. Essa variação justifica-se em função da maior amplitude proporcionada pelas doses de N.

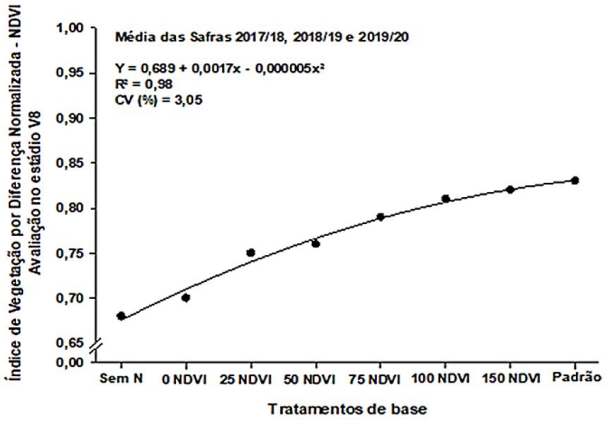


Figura 1. Variação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) da cultura do milho, média de três safras agrícolas (2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020).

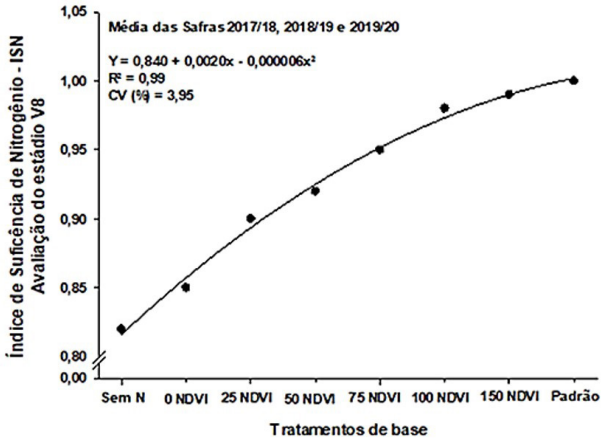


Figura 2. Índice de Suficiência de Nitrogênio (ISN) para milho, média de três safras agrícolas (2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020).

Os resultados encontrados corroboram com os apresentados por Chen et al. (2014), Thompson et al. (2015), Franzen et al. (2016) e Chim et al. (2017), que verificaram que a aplicação variável de N possibilita recomendar as doses necessárias em função da demanda nutricional da cultura, promovendo a maximização do potencial produtivo. Com base nessas informações, observa-se que os tratamentos que obtiveram o menor crescimento inicial também apresentaram maior demanda nutricional quando comparada com a parcela que recebeu a adubação padrão, reco-

mendada pelo manual de calagem e adubação. Porém, conforme a oferta de fertilizante no início do desenvolvimento diminui, o crescimento também é afetado e a diferença para o tratamento padrão aumenta; em outras palavras, a demanda de nitrogênio em cobertura aumenta.

Durante as safras agrícolas (2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020) destacam-se os elevados rendimentos de grãos obtidos com os métodos de adubação utilizados (Algoritmo + Padrão), obtendo-se rendimentos de grãos superiores a 13.000 kg ha^{-1}, em função das doses de N aplicadas no início do ciclo e as doses de N em cobertura. Como apresentado e discutido nas Figuras 1 e 2, que em razão da variação do NDVI calculou-se o ISN dos tratamentos, que por sua vez pode-se prescrever as doses de N para serem aplicadas, nos tratamentos com menor desenvolvimento inicial (0 NDVI e 25 NDVI), houve um menor valor de NDVI e, consequentemente, um menor ISN quando comparado com os tratamentos com maior desenvolvimento (100 NDVI e 150 NDVI). Em outras palavras, nos locais com as menores doses de N aplicadas no início, seriam as regiões da lavoura com menor desenvolvimento. Porém, nos locais onde as doses receberam as maiores doses de N no início do desenvolvimento, seriam as regiões da lavoura com o maior desenvolvimento, consequentemente receberiam as menores doses (Figura 3).

Observou-se que, com a utilização do algoritmo de adubação, possibilitou-se melhor redistribuição da dose de N aplicada em cobertura (estádio V8), apresentando uma correção da variabilidade espacial gerada no início do desenvolvimento da cultura, fator esse que potencializou o incremento de rendimento de grãos (Mota et al., 2015; Zhao et al., 2018).

O rendimento de grãos da testemunha (Sem N) que não recebeu nitrogênio foi de 7.837 kg ha^{-1}, sendo inferior ao tratamento tradicional PADRÃO (Manual de calagem e adubação), que produziu 12.992 kg ha^{-1}, e o método de adubação pelo algoritmo produziu os maiores rendimentos de grãos, 14.428 kg ha^{-1} (Figura 4). Esses resultados corroboram com os encontrados na literatura, que comprovam que a utilização de algoritmos para a adubação em cobertura auxilia na manutenção e/ou incremento do rendimento de grãos, com a redução da dose de N (Thompson et al., 2015; Franzen et al., 2016).

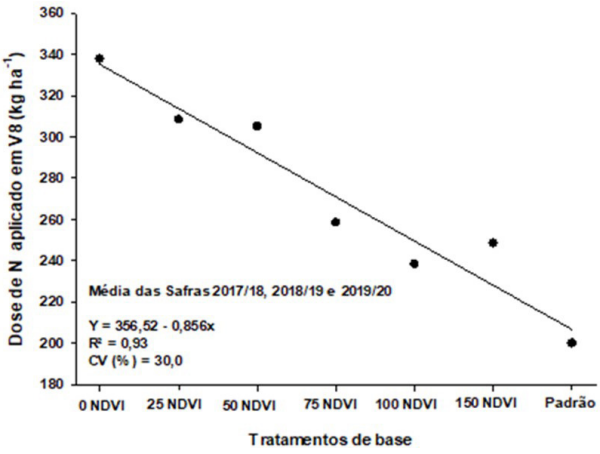


Figura 3. Dose de N aplicado em cobertura (kg N ha^{-1}) no estádio V8 na cultura do milho. *Média de três safras agrícolas (2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020).

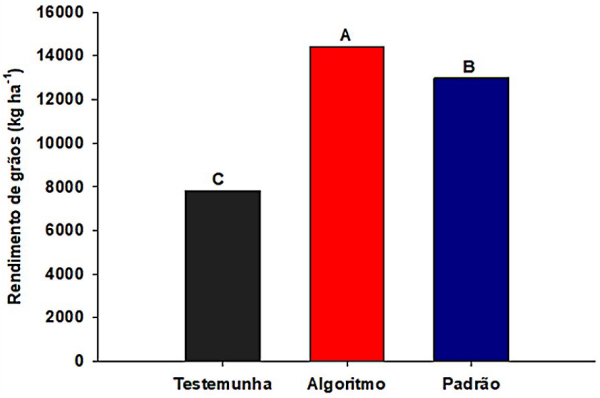


Figura 4. Rendimento de grãos (kg ha^{-1}) de milho, média de três safras agrícolas (2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020) e comparação entre os métodos de adubação (testemunha, Algoritmo e Padrão).

4 CONCLUSÃO

Para o algoritmo proposto para o milho, observou-se o incremento no rendimento de grãos e uma redistribuição das doses de nitrogênio aplicado em cobertura para as três safras agrícolas.

De modo geral, o algoritmo testado é considerado consistente e pode ser utilizado a campo, sendo que o algoritmo promove o reconhecimento da quantidade de N no tecido vegetal e realiza os ajustes conforme a demanda da cultura, realizando dessa forma uma redistribuição do N na lavoura.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento à Fundação Agrisus pelo apoio financeiro à pesquisa por meio do projeto 2222/17.

REFERÊNCIAS

AMARAL, T. A.; ANDRADE, C.L.T.; DUARTE, J.O.; GARCIA, J.C.; GARCIA Y GARCIA, A.; SILVA, D.F.; ALBERNAZ, W.M.; HOOGENBOOM, G. Nitrogen management stra-

tegies for smallholder maize production systems: yield and profitability variability. **International Journal of Plant Production**, v. 9, p. 75-98, 2015.

BECHE, E.; BENIN, G.; BORNHOFEN, E.; DALLÓ, S.C.; SASSI, L.H.S.; OLIVEIRA; R. Eficiência de uso de nitrogênio em cultivares de trigo pioneiras e modernas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 12, p. 948-957, 2014. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2014001200005.

BERGAMASCHI, H. et al. **Clima da Estação Experimental da UFRGS e região de abrangência**. Porto Alegre: UFRGS, 2003, 78 p.

BREDEMEIER, C.; VIAN, A. L.; PIRES, J. L. F. Aplicação de nitrogênio em tempo real: modelos e aplicações. In: SANTI, A. L. (ed.). **Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, RS: CESPOL, 2016. p.137-158.

CHEN, X.; CUI, Z.; FAN, M.; VITOUSEK, P.; ZHAO, M.; MA, W.; WANG, Z.; ZHANG, W.; YAN, X.; YANG, J.; DENG, X.; GAO, Q.; ZHANG, Q.; GUO, S.; REN, J.; LI, S.; YE, Y.; WANG, Z.; HUANG, J.; TANG, Q.; SUN, Y.; PENG, X.; ZHANG, J.; HE, M.; ZHU, Y.; XUE, J.; WANG, G.; WU, L.; AN, N.; WU, L.; MA, L.; ZHANG, W.; ZHANG, F. Producing more grain with lower environmental costs. **Nature**, v. 514, n. 7523, p. 486-489, 2014. DOI: http://doi.org/10.1038/nature13609.

CHIM, B. K.; BLACK, T.; DAVIS, P.; THOMASON, W. In-season decision support tools for estimating sidedress nitrogen rates for corn in the Mid-Atlantic Coastal Plain. **Journal of Plant Nutrition**, v. 40, n. 20, p. 2818-2828, 2017. DOI: http://doi.org/10.1080/01904167.2017.1382531.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016, 376 p.

ERDLE, K.; MISTELE, B.; SCHMIDHALTER, U. Compariso n of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. **Field Crops Research**, v. 124, n. 1, p. 74-84, 2011. DOI: http://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.007.

ERNANI, P. R. **Disponibilidade de nitrogênio e adubação nitrogenada para macieira.** Lages: Graphel, 2003. 76 p.

FIXEN, P. E. The four rights within a global fertilizer best management practices framework. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. (ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010. p.1-22.

FRANZEN, D.; KITCHEN, N.; HOLLAND, K.; SCHEPERS, J.; RAUN, W. Algorithms for in-season nutrient management in cereals. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 5, p. 1775, 2016. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj2016.01.0041.

IPAGRO. **Observações meteorológicas no estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: IPAGRO, 1979. 272 p. (Boletim Técnico, 3).

MOTA, M. R.; SANGOI, L.; SCHENATTO, D.E.; GIORDANI, W.; BONIATTI, C.M.; DALL'IGNA, L. Fontes estabilizadas de nitrogênio como alternativa para aumentar o rendimento de grãos e a eficiência de uso do nitrogênio pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 512-522, 2015. DOI: http://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140308.

POVH, F. P.; MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R.; SALVI, J.V. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 8, p. 1075-1083, 2008. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000800018.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. **How a corn plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1993. 26 p. (Special Report, 48).

SAIZ-FERNÁNDEZ, I.; DIEGO, N.; SAMPEDRO, M.C.; MENA-PETITE, A.; ORTIZ-BARREDO, A.; LACUESTA, M. High nitrate supply reduces growth in maize, from cell to whole plant. **Journal of Plant Physiology**, v. 173, p. 120-129, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.06.018.

SANGOI, L.; SILVA, L.M.M.; MOTA, M.R.; PANISON, F.; SCHMITT, A.; SOUZA, N.M.; GIORDANI, W.; SCHENATTO, D.E. Desempenho agronômico do milho em razão do tratamento de sementes com Azospirillum sp. e da aplicação de doses de nitrogênio mineral. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1141-1150, 2015. DOI: http://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140736.

SCHMIDT, J.; BEEGLE, D.; ZHU, Q.; SRIPADA, R. Improving in-season nitrogen recommendations for maize using an active sensor. **Field Crops Research**, v. 120, n. 1, p. 94-101, 2011. DOI: http://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.09.005.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. C. D. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER-RS, 2008. 222 p.

THOMPSON, L. J.; FERGUSON, R.B.; KITCHEN, N.; FRAZEN, D.W.; MAMO, H. YANG, H.; SCHEPERS, J.S. Model and sensor-based recommendations approaches for in-season nitrogen management in corn. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2020-2030, 2015. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj15.0116.

VIAN, A. L. **Sensores de vegetação para estimativa in situ potencial produtivo na cultura do milho**. 2015. 81 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

WELSH, J. P.; WOOD, G.A.; GODWIN, R.J.; TAYLOR, J.C.; EARL, R.; BLACKMORE, S.; KNIGHT, S.M. Developing strategies for spatially variable nitrogen application in cereals. Part I: Winter barley. **Biosystems Engineering**, v. 84, n. 4, p. 481-494, 2003. DOI: http://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00002-3.

ZHAO, B.; DUAN, A.; ATA-UL-KARIM, S.T.; LIU, Z.; CHEN, Z.; GONG, Z.; ZHANG, J.; XIAO, J.; LIU, Z.; QIN, A.; NING, D. Exploring new spectral bands and vegetation indices for estimating nitrogen nutrition index of summer maize. **European Journal of Agronomy**, v. 93, p. 113-125, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2017.12.006.

ZHU, Q.; SCHMIDT, J. P.; BRYANT, R. B. Maize (Zea mays L.) yield response to nitrogen as influenced by spatio-temporal variations of soil-water-topography dynamics. **Soil & Tillage Research**, v. 146, p. 174-183, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.006.

43

Modelo para indicação de adubação nitrogenada em cobertura na cultura do trigo utilizando sensor de vegetação

Model for indication of nitrogen fertilization in wheat crop using vegetation sensor

André Luis Vian[1], Christian Bredemeier[2], João Leonardo Fernandes Pires[3], Carolina Trentin[4], Maicon Andreo Drum[5], Manuele Zeni[6], Marcos Caraffa[7], Franciane Lemes dos Santos[8], Alexandre Alan Cassinelli[9], Anelise Brun[10], Marcelo de Carli Toigo[11], Rogério Ferreira Aires[12]

[1] *Engenheiro Agrônomo, Doutor em Fitotecnia, Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, andre.vian@ufrgs.br*

[2] *Engenheiro Agrônomo, Doutor em Nutrição de Plantas/Agricultura de Precisão, Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, bredemeier@ufrgs.br*

[3] *Engenheiro Agrônomo, Doutor em Fitotecnia/Plantas de Lavoura, Pesquisador, Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS, Brasil, joao.pires@embrapa.br*

[4] *Engenheira Agrônoma, Doutoranda em Agronomia, Universidade de Passo Fundo, Programa de Pós- Graduação em Agronomia, Passo Fundo (RS), Brasil, carolinatrentin@live.com*

[5] *Engenheira Agrônoma, Doutoranda em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, maicon.andreo@hotmail.com*

[6] *Engenheira Agrônoma, Doutoranda em Agronomia, Universidade de Passo Fundo, Programa de Pós- Graduação em Agronomia, Passo Fundo (RS), Brasil, zeni.manuele@gmail.com*

[7] *Engenheiro Agrônomo, Mestre em Fitotecnia, Sociedade Educacional Três de Maio, Três de Maio, RS, Brasil, carrafa@setrem.com.br*

[8] *Engenheira Agrônoma, Doutora em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Solos, Porto Alegre (RS), Brasil, franciane_lemes@hotmail.com*

[9] *Estudante de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, alexandrealanc@gmail.com*

[10] *Engenheira Agrônoma, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Porto Alegre (RS), Brasil, anelisebrun@gmail.com*

[11] *Engenheiro Agrônomo, Mestre em Produção Vegetal, Pesquisador, Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação do Estado do Rio Grande do Sul, Vacaria, RS, Brasil, marcelo-toigo@agricultura.rs.gov.br*

[12] *Engenheiro Agrônomo, Doutor em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Pesquisador, Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação do estado do Rio Grande do Sul, Vacaria, RS, Brasil, rogerio-aires@agricultura.rs.gov.br*

RESUMO

A eficiência do uso do nitrogênio (N) pela cultura do trigo pode ser maximizada por meio de ajustes na recomendação para lavouras comerciais com o uso de ferramentas da Agricultura de Precisão (AP). Uma das maneiras de definir a dose da adubação nitrogenada para a necessidade da cultura é estimando o estado e a demanda nutricional do dossel vegetal, de modo a considerar a variabilidade espacial existente na lavoura. O objetivo foi desenvolver um modelo de adubação nitrogenada em cobertura na cultura do trigo por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), para otimizar a aplicação de nitrogênio conforme a necessidade da cultura. O modelo foi construído a partir de dados oriundos de experimentos conduzidos a campo em quatro regiões do Rio Grande do Sul. A partir dos resultados obtidos, encontrou-se alta relação entre o NDVI com a biomassa, conteúdo de nitrogênio do dossel vegetal e com o modelo para adubação nitrogenada. Portanto, o modelo proposto apresenta potencial para otimizar o uso de N e, consequentemente, maximizar o rendimento de grãos e/ou a rentabilidade da cultura.

Palavras-chave: *Triticum aestivum* L.; NDVI; Greenseeker; algoritmo.

ABSTRACT

The efficiency of nitrogen (N) use by the wheat crop can be maximized through adjustments in the recommendation for commercial crops with the use of Precision Agriculture (PA) tools. One way to define the dose of nitrogen fertilizer for the crop needs is to estimate the nutritional status and demand of the plant canopy, in order to consider the

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000013

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

spatial variability existing in the field. The objective was to develop a model for nitrogen fertilization in the wheat crop using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), in order to optimize the application of nitrogen according to crop needs. The model was built based on data from field experiments conducted in four regions of Rio Grande do Sul. From the results obtained, a high relationship was found between NDVI with biomass, the nitrogen content of the plant canopy, and the model for nitrogen fertilization. Therefore, the proposed model presents the potential to optimize N use and, consequently, maximize grain yield and/or crop profitability.

Keywords: NDVI; Greenseeker; algorithm; *Triticum aestivum* L.

1 INTRODUÇÃO

A indicação de adubação nitrogenada para a cultura do trigo no Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC) é definida em função do teor de matéria orgânica no solo, da cultura antecessora e da expectativa de rendimento de grãos (Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, 2020). Esta forma de definição da dose, apesar de consolidada na prática, desconsidera a variabilidade espacial do crescimento das plantas em uma determinada lavoura e da dinâmica da disponibilidade de nitrogênio (N), sendo influenciados pelos diferentes tipos de solo, climas, mineralização da matéria orgânica, variações de relevo, variabilidade de distribuição de palha da cultura antecessora, entre outros (Drum et al., 2018). Nesse sentido, há espaço para o aprimoramento da metodologia de adubação nitrogenada em cobertura em trigo, incorporando, por exemplo, ferramentas da Agricultura de Precisão (AP).

O aumento da eficiência no uso do N na cultura do trigo pelo ajuste da adubação nitrogenada em função da demanda nutricional das plantas e da expectativa de rendimento de grãos, levando em consideração a variabilidade espacial do crescimento das plantas, é uma forma viável de se obter ganhos produtivos e sustentáveis na agricultura, devido à redução de perdas de N para o ambiente (Vian et al., 2018). Para realizar a indicação da dose de N em função da demanda nutricional das plantas, alguns modelos foram desenvolvidos para que as aplicações a taxa variada pudessem se tornar uma realidade. Esses modelos consideram variáveis como a disponibilidade de N no solo, as condições meteorológicas, o estádio de desenvolvimento da cultura, o conteúdo de clorofila das folhas, a demanda nutricional e o potencial produtivo (Raun et al., 2005; Shanahan et al., 2008; Holland; Schepers, 2013; Torres-Dorante et al., 2016; Padilla et al., 2018). Porém, a dificuldade em trabalhar a campo com essas inúmeras variáveis necessárias para viabilizar o uso desses algoritmos demandou a necessidade do desenvolvimento de modelos mais simples para aplicação no campo. Desta forma, entende-se que a implementação e a utilização dos modelos ocorrerão a partir da facilidade de seu uso, além de serem calibrados e validados para as diferentes condições edafoclimáticas da região Sul do Brasil.

Alguns trabalhos já foram desenvolvidos para as culturas da cana-de-açúcar, do algodão e do milho nas condições edafoclimáticas do Cerrado brasileiro (Tarpley et al., 2000; Rosa et al., 2015). Entretanto, esses modelos não possuem o mesmo desempenho nas lavouras da região Sul, especialmente se consideradas as condições da elevada variabilidade espacial e temporal, onde é realizado o cultivo de trigo e outros cereais de inverno. Assim, o objetivo do presente estudo foi desenvolver um modelo de indicação da dose de adubação nitrogenada em cobertura em trigo em função da demanda nutricional de N, usando o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos, para o desenvolvimento do modelo de indicação da dose de N a ser aplicada em cobertura em trigo, foram conduzidos a campo em 2015, 2017, 2018 e 2019, em quatro municípios do estado do Rio Grande do Sul (Coxilha e Vacaria, pertencentes à Região Homogênea de Adaptação de Cultivares 1 - RHACT 1, considerada fria e úmida, e Eldorado do Sul e Três de Maio, pertencentes à RHACT 2, considerada moderadamente quente e úmida) (Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, 2020) (Figura 1).

Na RHACT 1, situam-se as áreas experimentais da Embrapa Trigo, em Coxilha (RS), e da Secretaria da Agricultura, Pecuária Produção Sustentável e Irrigação do RS (Seapi), em Vacaria (RS), localizadas nas regiões fisiográficas do Planalto Médio e dos Campos de Cima da Serra, respectivamente (Silva et al., 2015). Em Coxilha, o clima é subtropical de verão úmido quente (Tipo Cfa) e, em Vacaria, o clima é subtropical de verão ameno (Tipo Cfb), conforme a classificação de Koppen (INMET, 2016) (Tabela 1). Na RHACT 2, situam-se a Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), em Eldorado do Sul (RS), e a área experimental da Sociedade Educacional Três de Maio (SETREM), em Três de Maio (RS), localizadas nas regiões fisiográficas da Depressão Central e das Missões, respectiva-

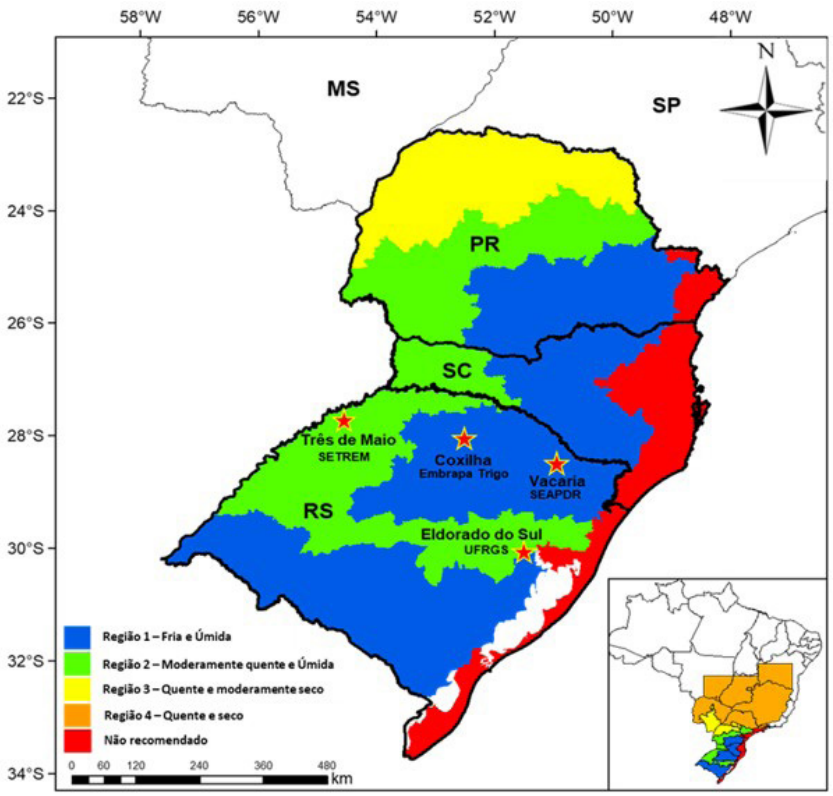


Figura 1. Localização dos experimentos em quatro municípios (marcados em vermelho) do Estado do Rio Grande do Sul (RS). SC = Santa Catarina; PR = Paraná.

Tabela 1. Descrição das principais características edafoclimáticas dos locais de condução dos experimentos para desenvolvimento do modelo de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do trigo.

Município (Instituição)	Precipitação pluvial[1] (mm)	Tipo de solo[2]	Média de temperatura[3] (°C)		Altitude (m)
			Mínima	Máxima	
Coxilha (Embrapa Trigo)	1.788	Latossolo Vermelho Distrófico húmico	12,9	22,0	689
Vacaria (Seapi)	1.800	Latossolo Vermelho Distroférrico	7,3	25,6	955
Eldorado do Sul (UFRGS)	1.440	Argissolo Vermelho Distrófico típico	14,0	25,0	46
Três de Maio (SETREM)	1.725	Latossolo Vermelho Distroférrico típico	15,0	25,8	343

[1]Precipitação pluvial média anual - Período 1991-2010; [2]Segundo classificação proposta por Streck *et al.* (2008); [3] Temperatura do ar média anual no mês mais frio (mínima) e no mais quente (máxima) – Período 1991-2010 (INMET, 2016).

mente. O clima nos dois locais é subtropical de verão úmido quente (tipo Cfa) (INMET, 2016) (Tabela 1).

Os tratamentos consistiram de diferentes cultivares de trigo e estratégias de aplicação de N em cobertura. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, com parcelas subdivididas e quatro repetições. Nas parcelas principais, foram alocadas as cultivares e, nas subparcelas, as estratégias de aplicação de N em cobertura. A unidade experimental foi composta por dez linhas de três metros de comprimento com espaçamento entre linhas de 0,17 m, totalizando 5,1 m^2.

Foram utilizadas seis cultivares, com variações dependendo do ano e local, sendo todas indicadas para cultivo nas RHACTs 1 e 2 (Tabela 2). O critério de escolha das cultivares foi baseado na representatividade em área cultivada comercialmente nos diferentes anos de condução dos experimentos.

Nas subparcelas, as estratégias de aplicação de N em cobertura constaram da aplicação de diferentes doses de nitrogênio (sem N, 15, 30, 45 e 60 kg N ha^{-1}) na emergência das plantas, tendo como fonte nitrogenada a ureia (45% de N). Já a dose de N em cobertura, aplicada no estádio de seis folhas completamente

Tabela 2. Descrição das principais características agronômicas das cultivares de trigo utilizadas nos experimentos para desenvolvimento do modelo de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do trigo.

Cultivar	Ciclo[1] (dias)	Porte	Hábito de crescimento	Experimento (Instituição)	Ano
BRS Parrudo	135	Médio	Ereto	Embrapa Trigo[1], Seapi[2] UFRGS[3], SETREM[4]	2017, 2018, 2019
BRS Marcante	133	Médio	Semiereto	Embrapa Trigo[1], Seapi[2]	2018
TBIO Sossego	130	Médio	Semiereto	Embrapa Trigo[1], Seapi[2] UFRGS[3], SETREM[4]	2017, 2018
TBIO Toruk	145	Baixo	Semiereto	UFRGS[3]	2015, 2019
TBIO Sinuelo	150	Médio	Semi-ereto	UFRGS[3]	2015
TBIO Sintonia	128	Médio	Semi-ereto	UFRGS[3]	2015

[1]Embrapa Trigo – Coxilha (RHACT 1); [2]Seapi – Vacaria (RHACT 1); [3]UFRGS – Eldorado do Sul (RHACT 2); [4]SETREM – Três de Maio (RHACT 2).
Fonte: Reunião... (2020).

expandidas em cada subparcela, foi ajustada conforme o modelo indicado na sequência.

As aplicações de diferentes doses de N na emergência tinham a finalidade de promover variabilidade no desenvolvimento das plantas, alterando a produção de biomassa da parte aérea e a quantidade de N absorvido no estádio de seis folhas completamente expandidas, com o intuito de simular a variabilidade encontrada nas lavouras comerciais, criando, assim, diferentes demandas potenciais de N nas plantas.

Os experimentos foram conduzidos após a cultura da soja, uma vez que esta é a cultura antecessora ao trigo que ocorre com maior frequência no RS. A densidade de semeadura foi de 300 sementes aptas m^2, sendo semeado no início do período indicado pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) para cada local. A adubação de base de fósforo e potássio seguiu as indicações técnicas para a cultura do trigo para potencial produtivo de 5.000 kg ha^{-1} (Reunião..., 2016). Antes da execução dos experimentos de campo, foram realizadas amostragens de solo para caracterização química das áreas e basear a adubação fosfatada e potássica.

No estádio de seis folhas expandidas, foram avaliados o NDVI, a produção de biomassa e a quantidade de N acumulado na parte aérea. A avaliação do NDVI foi realizada por meio da leitura da reflectância do dossel vegetativo com sensor óptico ativo GreenSeeker®. As leituras foram feitas com o equipamento percorrendo as linhas centrais das parcelas com altura 0,8 m acima do dossel da cultura. O NDVI foi calculado conforme a Fórmula 1.

$$NDVI=(IVP-V)/(IVP+V) \quad (1)$$

Onde:

V = reflectância no vermelho (680 nm) e IVP = reflectância na região do infravermelho próximo (770 nm).

A biomassa na parte aérea foi quantificada pela amostragem de três linhas com 0,5 m de comprimento, totalizando 0,27 m^2. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa de ar forçado à temperatura de 60 °C até atingir peso constante e, após, pesadas. Foi avaliada a concentração de N no tecido vegetal, seguindo o método Kjeldahl (Tedesco et al., 1995). A quantidade de N acumulada na parte aérea foi obtida pela multiplicação da quantidade de biomassa seca da parte aérea pela concentração de N no tecido, sendo expressa em "kg ha^{-1}".

O modelo proposto neste trabalho foi desenvolvido considerando a demanda nutricional de nitrogênio pela cultura do trigo no estádio de seis folhas completamente expandidas na escala proposta por Haun (1973), no estádio 3 da escala proposta por Feekes (Large, 1954) e no estádio 23 da escala proposta por Zadoks et al. (1974), sendo este estádio que marca o início do período anterior de maior demanda de N pela planta, no qual pode ser mais facilmente identificado utilizando índices de vegetação e que pode ser indicada a adubação nitrogenada em cobertura (Bredemeier; Mundstock, 2001).

Foi considerada a curva de absorção "ideal" de N pela cultura do trigo para obtenção de rendimento de grãos elevado, proposta por Wiethölter (2011). Essa curva se caracteriza pela absorção elevada de N entre os estádios de alongamento dos entrenós e espigamento, podendo atingir o máximo da absorção próximo aos 100 dias após a emergência das plantas. No estádio de seis folhas expandidas, as plantas de trigo precisam acumular em seus tecidos 35 kg N ha^{-1} na parte aérea, para que rendimentos de grãos próximos de 5.000 kg ha^{-1} possam ser alcançados. Dessa forma, o modelo proposto tem por objetivo de indicar a dose de N em cobertura indicada pela Comissão Brasileira

de Pesquisa de Trigo e Triticale, para a RHACT1 (100 kg N ha^{-1}) e RHACT2 (80 kg N ha^{-1}) (Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, 2020), acrescida da quantidade de N faltante ou redução da quantidade excedente em relação ao padrão de 35 kg N ha^{-1}, que será estimado pela leitura do NDVI e predito pelos modelos validados para os experimentos desenvolvidos. Para indicar a dose a ser utilizada pelo produtor, deve-se seguir a Fórmula 2.

$$\textit{Dose indicada de N em cobertura}\left(\textit{kg ha}^{-1}\right) = 35 - [N]\ \textit{absorvido} + \textit{Padrão} \quad (2)$$

Onde:
"35" refere-se à quantidade padrão de N (em kg ha^{-1}) que a planta deve ter acumulado na parte aérea até o estádio de seis folhas completamente expandidas; [N] absorvido refere-se à quantidade real de N acumulada em um determinado local/ano (kg ha^{-1}), e "Padrão" refere-se à dose de N em cobertura indicada pela Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale (2020), sendo estimada de 80 kg ha^{-1} para a RHACT 2 e de 100 kg ha^{-1} para a RHACT 1, para potencial de rendimento de grãos de 5.000 kg ha^{-1}.

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo Teste F e, posteriormente, análise de regressão entre as variáveis analisadas ao nível de p <0,05, com auxílio do pacote estatístico SAS™ (Statistical Analysis System - SAS 8.0).

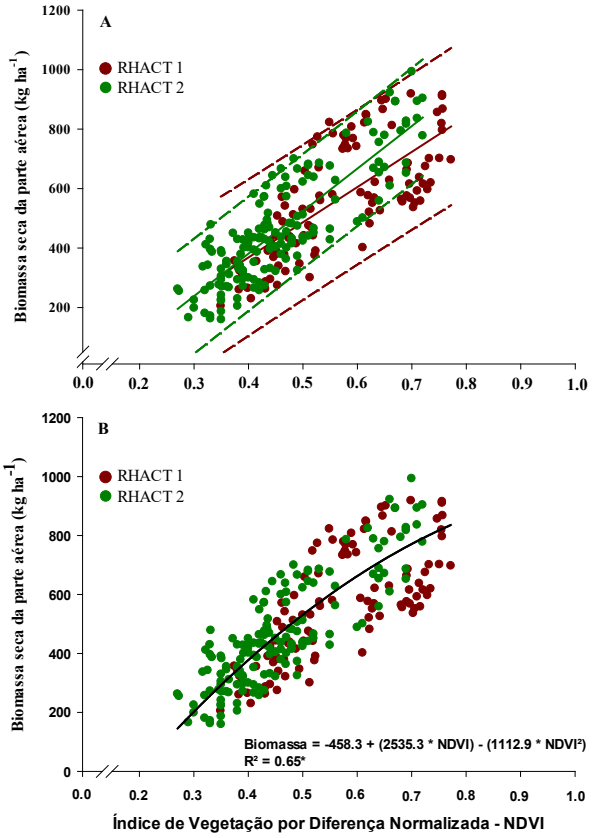


Figura 2. Relação entre a biomassa na parte aérea do trigo e valores do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), em duas Regiões Homogêneas de Adaptação de Cultivares de Trigo no sul do Brasil (RHACT), sendo: RHACT 1 - vermelho e RHACT 2 - verde. Considerando os diferentes locais, anos e doses de N aplicadas na emergência das plantas em função das doses de nitrogênio aplicadas na semeadura. * Significativo a p<0,05.

3 RESULTADOS

Na Figura 2 é apresentada a relação entre a biomassa seca da parte aérea com os valores de NDVI no estádio de seis folhas completamente expandidas. Observa-se que, conforme ocorre o aumento nos valores de biomassa seca, ocorre incremento nos valores de NDVI (R^2 = 0,65), sendo esse r^2 valor semelhante aos encontrados por Vian et al. (2018), em trabalho com a cultura do trigo usando sensores de vegetação. Observa-se que os valores de biomassa seca na parte aérea variaram entre 185 kg de biomassa ha^{-1} a 1.190 kg de biomassa ha^{-1}, enquanto os valores de NDVI variaram entre 0,26 e 0,78, respectivamente (Figura 2).

A biomassa na parte aérea da cultura do trigo é importante, pois é responsável, entre outras coisas, pela taxa fotossintética da cultura. A quantidade de biomassa na parte aérea do trigo tem alta relação com as quantidades de N disponíveis às plantas, quando coletadas no estádio de seis folhas completamente expandidas, além de apresentar alta relação com os valores de NDVI (Li et al., 2018; Vian et al., 2018).

A variação de produção de biomassa e, consequentemente, no acúmulo de N nos tecidos vegetais pode ser estimada, de forma indireta, pelo emprego de sensores de vegetação, os quais informam um índice de vegetação, como, por exemplo, o NDVI. Este índice de vegetação é formado por dois comprimentos de onda: o vermelho e o infravermelho próximo. A maior disponibilidade de N para as plantas proporciona maior acúmulo de biomassa fotossinteticamente ativa. Dessa forma, há maior reflectância no infravermelho e maior absorção da radiação no vermelho, devido à concentração de clorofilas com aumento nos valores de NDVI (Coelho et al., 2018).

Também, a quantidade de N acumulada na parte aérea está ligada com a disponibilidade de N no solo, pois, quando da variação na disponibilidade de N no solo (exemplo: nitrato, nitrito e amônia), há variação na quantidade de N absorvida e acumulada no dossel da cultura (Meng et al., 2013; Carvalho et al., 2016). Quando se analisou a relação das quantidades de N acumulado na parte aérea e os valores de NDVI para

as cultivares utilizadas (BRS Marcante, BRS Parrudo, TBIO Sinuelo, TBIO Sintonia, TBIO Sossego e TBIO Toruk), foi possível representar essa relação com um modelo de regressão único. A relação entre a quantidade de N acumulada e o NDVI é alta, como se pode verificar na Figura 3, observando-se aumento dos valores da quantidade de N acumulado na parte aérea, aumentando de forma similar os valores de NDVI. Observa-se que os valores de N acumulado variaram entre 5 kg de N ha^{-1} e 55 kg de N ha^{-1}, enquanto os valores de NDVI variaram entre 0,26 e 0,78, respectivamente (Figura 3).

Na Figura 4, a linha tracejada vermelha indica a quantidade mínima de nitrogênio acumulada na parte aérea das plantas no estádio de seis folhas completamente expandidas, visando à obtenção de rendimento de grãos elevado. A estimativa do balanço de N na planta foi baseada pela Fórmula 3:

$$\textit{Balanço de N na planta} = 35\ \textit{kg de N ha}^{-1} - \textit{N acumulado no tecido}\left(\textit{kg N ha}^{-1}\right) \quad (3)$$

Onde:
"35" refere-se à quantidade padrão de N (em kg ha^{-1}) que a planta deve ter acumulado na parte aérea até o estádio de seis folhas completamente expandidas; N acumulado no tecido (kg ha^{-1}) é estimado pelo modelo matemático (y = -9,2172 + 54,92*NDVI), apresentada na Figura 4.

Observa-se que os sensores ópticos de dossel são capazes de estimar o teor de N no tecido em tempo real com nível adequado de precisão. Essa ferramenta possibilita estimar a absorção do N na parte aérea da cultura em tempo real ao longo do ciclo de crescimento da cultura.

As etapas anteriores de construção do modelo serviram para estimar as quantidades de N acumulado no dossel vegetativo (kg ha^{-1}) e quantificar a demanda de N pela cultura no estádio de seis folhas expandidas, possibilitando desenvolver a terceira etapa, ou seja, o desenvolvimento do modelo para aplicação de N à taxa variada, baseado nos valores de NDVI avaliados no estádio da sexta folha completamente expandida.

Este modelo foi definido com o objetivo de ser simples e prático a campo. O modelo matemático segue a Fórmula 2, apresentada no item material e métodos (Dose indicada = 35 - [N] absorvido + Padrão). Com base nessas informações, foram construídas duas curvas de indicação de N em cobertura, uma para a RHACT 1 (100 kg ha^{-1}) e outra para RHACT 2 (80 kg ha^{-1}), como é previsto pela Comissão Brasileira de

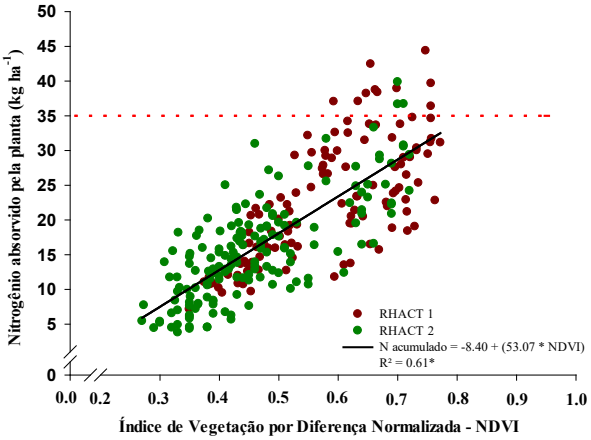


Figura 3. Relação entre os valores do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e a quantidade de nitrogênio acumulada na parte aérea do trigo em função das doses de nitrogênio aplicadas na semeadura. Linha tracejada vermelha indica a concentração mínima de nitrogênio que a cultura precisa ter absorvido (kg N ha^{-1}) no estádio de seis folhas completamente expandidas. * Significativo a p<0,05. Regiões Homogêneas de Adaptação de Cultivares de Trigo no sul do Brasil (RHACT), sendo: RHACT 1 - vermelho e RHACT 2 - verde.

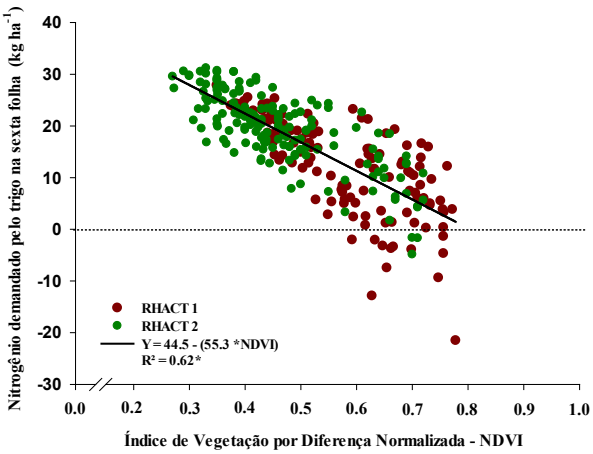


Figura 4. Nitrogênio acumulado no tecido (kg N ha^{-1}) do trigo no estádio de seis folhas completamente expandidas. * Significativo a p<0,05. Regiões Homogêneas de Adaptação de Cultivares de Trigo no sul do Brasil (RHACT), sendo: RHACT 1 - vermelho e RHACT 2 - verde.

Pesquisa de Trigo e Triticale (Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, 2020).

Na Figura 5A e 5B, são apresentadas as curvas de indicação de adubação nitrogenada em cobertura para trigo, considerando a quantidade de N e de ureia, respectivamente. Na Figura 5A, o modelo proposto obteve valor do coeficiente de correlação de r = 0,72 (RHACT 1) e r = 0,79 (RHACT 2), considerando todas as cultivares, locais e anos. Foi definido que a dose sofre variação em função dos valores de NDVI, sendo calculada a partir da fórmula: RHACT 1 - Dose de N (kg ha^{-1}) = 142,22 + (50,837*NDVI) e RHAC 2 - Dose de N (kg ha^{-1}) = 123,94 + (54,005*NDVI). Observa-se que

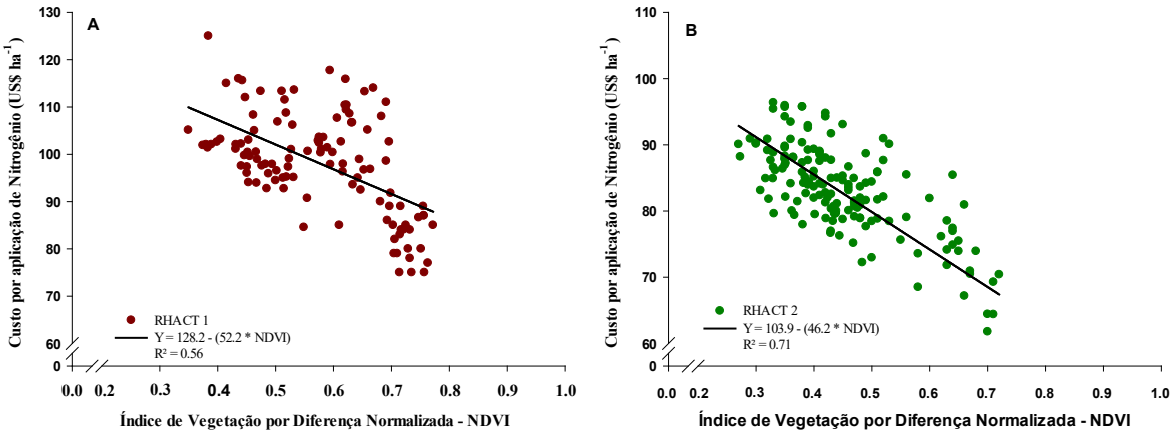


Figure 5. Estimativa de custos em dólares (US$) com o uso de nitrogênio em função do modelo proposto para o manejo da adubação nitrogenada em cobertura de trigo no estádio de seis folhas totalmente expandidas para as regiões de cultivo no sul do Brasil (RHACT), sendo RHACT 1 - A e RHACT 2 - B.

houve uma variação entre os menores e maiores valores de NDVI, promovendo assim a variação nas doses indicadas de N entre 130 e 100 kg N ha^{-1}, respectivamente (RHACT 1). Já para a RHACT 2, verificou-se uma variação entre 110 e 85 kg N ha^{-1}, entre os menores e maiores valores de NDVI.

Foi definido que a dose sofre variação em função dos valores de NDVI, sendo calculada a partir da fórmula: RHACT 1 - Dose de ureia (45% N) (kg ha^{-1}) = 316,04 + (112,97 NDVI) e RHACT 2 - Dose de ureia (45% N) (kg ha^{-1}) = 275,43 + (120,01 NDVI). Observa-se que houve uma variação entre os menores e maiores valores de NDVI, promovendo assim a variação nas doses indicada de ureia entre 230 e 290 e kg N ha^{-1}, respectivamente (RHACT 1). Já para a RHACT 2, houve uma variação entre 190 e 250 e kg N ha^{-1}, respectivamente.

Essa variação é explicada em razão de as plantas apresentarem teores elevados de N acumulados no tecido vegetal, no estádio da sexta folha completamente expandida. Porém, para baixos valores de NDVI, observa-se que o N acumulado no tecido é baixo e, consequentemente, deverá receber uma dose maior de N, ou seja, doses próximas a 130 kg de N ha^{-1}. Dessa forma, o modelo tem por objetivo distribuir, de maneira adequada, o nitrogênio que seria aplicado em dose uniforme em toda área, o que promove o melhor aproveitamento do N pelas plantas, maximiza o rendimento de grãos, reduz a contaminação ambiental e pode resultar em menor custo de produção, dependendo da situação.

O desenvolvimento de algoritmos robustos para a adubação nitrogenada, com praticidade e eficiência de uso, é discutido por diversos autores e para diferentes culturas no Brasil e no mundo, sendo cada vez mais disponibilizados para utilização em lavouras comerciais. No entanto, é fundamental utilizar variáveis regionais para o desenvolvimento e validação desses modelos, caracterizando as variáveis edafoclimáticas da região de cultivo e a interação genótipo x ambiente. Tarpley et al. (2000) desenvolveram um algoritmo de adubação nitrogenada em cobertura para a cultura do algodoeiro, baseado em sensores de vegetação. Vian et al. (2018) desenvolveram método de aplicação de N em cobertura para a cultura do trigo em relação à dose de máxima eficiência técnica, usando o NDVI.

Com a utilização do modelo de indicação de N em cobertura em taxa variada utilizando o NDVI, pode-se estimar os custos médios, em dólar (US$) ha^{-1} (Associação Comercial, Industrial e de Serviços de Novo Hamburgo, Campo Bom e Estância Velha, 2021), considerando um valor médio da ureia de US$ 0,37 kg $ureia^{-1}$ (safras 2015 e 2017), US$ 0,43 kg $ureia^{-1}$ (safra 2018) e US$ 0,39 kg $ureia^{-1}$ (safra 2019) (Companhia Nacional de Abastecimento, 2021). Na Figura 5, são apresentadas as curvas com os referidos custos para ambas as regiões estudadas, RHACT 1 e RHACT 2. As regiões apresentaram uma variação acima de US$ 25,00 ha^{-1}. Na RHACT 1, houve uma variação entre US$ 75,00 e 125,00 ha^{-1}, e, para a RHACT 2, uma variação entre US$ 62,00 e 98,00 ha^{-1}, entre os menores e maiores valores de NDVI utilizados no modelo.

4 CONCLUSÕES

A resposta espectral do trigo, a partir de valores de NDVI, para a estimativa da quantidade de N acumulado no tecido, mostra que a geração do modelo baseado em dados relacionando a quantidade de N acumulada e o NDVI possui elevada precisão e permite a utilização em lavouras comerciais para a estimativa deste parâmetro.

O modelo proposto possui potencial para aprimoramento da indicação de adubação nitrogenada em cobertura na cultura do trigo, pois permite variação adequada da dose de N na área, quando comparada com a utilização de dose fixa.

O modelo proposto apresenta facilidade de implementação, devido à relação da quantidade de N na parte aérea com os valores de NDVI, conferindo um modelo simples para a indicação de N à taxa variada em trigo, utilizando sensor ativo de vegetação.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento à Fundação Agrisus pelo apoio financeiro da pesquisa por meio do projeto 2222/17. Também, à Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação do RS pela cedência de área para realização dos ensaios em Vacaria, RS.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO COMERCIAL, INDUSTRIAL E DE SERVIÇOS DE NOVO HAMBURGO, CAMPO BOM E ESTÂNCIA VELHA. **Cotação do Dolar**, 2021. Disponível em: http://www.acinh.com.br/servicos/cotacao-dolar. Acesso em: 20 jan. 2022.

BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C. M. Estádios fenológicos do trigo para a adubação nitrogenada em cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 317-323, 2001. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-06832001000200008.

CARVALHO, J. M. G.; BONFIM-SILVA, E. M.; SILVA, T. J. A.; SOUSA, H. H. F.; GUIMARÃES, S. L.; PACHECO, A. B. Nitrogen and potassium in production, nutrition and water use efficiency in wheat plants. **Ciencia e Investigación Agraria**, v. 43, n. 3, p. 442-451, 2016. DOI: http://doi.org/10.4067/S0718-16202016000300010.

COELHO, A. P.; ROSALEN, D. L.; FARIA, R. T. Vegetation index in the prediction of biomass and grain yield of White oat under irrigation levels. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, n. 2, p. 109-117, 2018. DOI: http://doi.org/10.1590/1983-40632018v4851523.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Insumos Agropecuários**, 2021. Disponível em: https://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultaInsumo.do?method=acaoCarregarConsulta

DRUM, M. A.; TRENTIN, C.; VIAN, A. L.; BREDEMEIER, C. Development and validation of algorithm for nitrogen fertilization at varied rate in maize. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 24, n. 3, p. 53, 2018.

HAUN, J. R. Visual quantification of wheat development. **Agronomy Journal**, v. 65, n. 1, p. 116-119, 1973. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010035x.

HOLLAND, K. H.; SCHEPERS, J. S. Use of a virtual-reference concept to interpret active canopy sensor data. **Precision Agriculture**, v. 14, n. 1, p. 71-85, 2013. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-012-9301-6.

INMET. **Normais Climatológicas**, 2016. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/portal /index.php? r=clima/normaisClimatologicas. Acesso em: 10 jan. 2019.

LARGE, E. C. Growth stages in cereais: illustration of the feekes scale. **Plant Pathology**, v. 3, n. 4, p. 128-129, 1954. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1954.tb00716.x.

LI, D.; WANG, X.; ZHENG, H.; ZHOU, K.; YAO, X.; TIAN, Y.; ZHU, Y.; CAO W.; CHENG, T. Estimation of area-and mass-based leaf nitrogen contents of wheat and rice crops from water-removed spectra using continuous wavelet analysis. **Plant Methods**, v. 76, p. 1-20, 2018. DOI: http://doi.org/10.1186/s13007-018-0344-1.

MENG, Q.; YUE, S.; CHEN, X.; CUI, Z.; YE, Y.; MA, W.; TONG, Y.; ZHANG, F. Understanding Dry Matter and Nitrogen Accumulation with Time-Course for High-Yielding Wheat Production in China. **PLoS One**, v. 8, n. 7, p. e68783, 2013. DOI: http://doi.org/10.1371/journal.pone.0068783.

PADILLA, F. M.; GALLARDO, M.; PEÑA-FLEITAS, M. T.; SOUZA, R.; THOMPSON, R. B. Proximal optical sensors for nitrogen management of vegetable crops: a review. **Sensors**, v. 18, n. 7, p. 2083, 2018. DOI: http://doi.org/10.3390/s18072083.

RAUN, W. R.; SOLIE, J. B.; STONE, M. L.; MARTIN, K. L.; FREEMAN, K. W.; MULLEN, R. W.; ZHANG, H.; SCHEPERS, J. S.; JOHNSON, G. V. Optical sensor based algorithm for crop nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 36, n. 19/20, p. 2759-2781, 2005. DOI: http://doi.org/10.1080/00103620500303988.

COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE. **Informações técnicas para trigo e triticale:** safra 2016. Passo Fundo: Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, 2016, 228 p.

COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE. **Informações técnicas para trigo e triticale:** safra 2020. Passo Fundo: Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, 2020. 255 p.

ROSA, H. J. A.; AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P.; CANTARELLA, H. Sugarcane response to nitrogen rates, measured by a canopy reflectance sensor. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 9, pp. 840-848, 2015. DOI: http://dxdoi.org/10.1590/S0100-204X2015000900013.

SHANAHAN, J. F.; KITCHEN, N. R.; RAUN, W. R.; SCHEPERS, J. S. Responsive in-season nitrogen management for cereals. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 61, n. 1, p. 51-62, 2008. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2007.06.006.

SILVA, J. A. G.; ARENHARDT, E. G.; KRÜGER, C. A. M. B.; LUCCHESE, O. A.; METZ, M.; MAROLLI, A. A expressão dos componentes de produtividade do trigo pela classe tecnológica e aproveitamento do nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19,

n. 1, p. 27-33, 2015. DOI: http://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n1p27-33.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P., GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS ASCAR, 2008. 222 p.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

TARPLEY, L.; REDDY, K. R.; SASSENRATH-COLE, G. F. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration. **Crop Science**, v. 40, n. 6, p. 1814-1819, 2000. DOI: http://doi.org/10.2135/cropsci2000.4061814x.

TORRES-DORANTE, L.; PAREDES-MELESIO, R.; LINK, A.; LAMMEL, J. A methodology to develop algorithms that predict nitrogen fertilizer needs in maize based on chlorophyll measurements: a case study in central Mexico. **Journal of Agriculture Science**, v. 154, n. 4, p. 705-719, 2016. DOI: http://doi.org/10.1017/S002185961500074X.

VIAN, A. L.; BREDEMEIER, C.; TURRA, M. A.; GIORDANO, C. P. S.; FOCHESATTO, E.; SILVA, J. A.; DRUM, M. A. Nitrogen management in wheat based on the normalized difference vegetation index (NDVI). **Ciência Rural**, v. 48, n. 9, pp. 1-9, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/0103--8478cr20170743.

WIETHÖLTER, S. Fertilidade do solo e a cultura do trigo no Brasil. In: PIRES, J. L. F.; VARGAS, l.; CUNHA, G. R. (eds.). **Trigo no Brasil:** bases para produção competitiva e sustentável. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2011. p.135-184.

ZADOKS, J. C.; CHANG, T. T.; KONZAK, C. F. A decimal code for the growth stages of cereals. **Weed Research**, v. 14, n. 6, p. 415-421, 1974. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x.

Manejo da fertilidade do solo para reduzir danos do nematoide *Pratylenchus brachyurus* em soja

44

Soil fertility management to reduce damages caused by Pratylenchus brachyurus in soybean

Julio Cezar Franchini dos Santos[1], Henrique Debiasi[2], Edison Ulisses Ramos Junior[3], Alvadi Antônio Balbinot Junior[4], Valéria de Oliveira Faleiro[5] e Laurimar Gonçalves Vendrúsculo[6]

[1] *Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, julio.franchini@embrapa.br*
[2] *Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, henrique.debiasi@embrapa.br*
[3] *Pesquisador, Embrapa Soja, Sinop (MT), Brasil, edison.ramos@embrapa.br*
[4] *Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, alvadi.balbinot@embrapa.br*
[5] *Pesquisadora, Embrapa Agrossilvipastoril, Sinop (MT), Brasil, valeria.faleiro@embrapa.br*
[6] *Pesquisadora, Embrapa Agrossilvipastoril, Sinop (MT), Brasil, laurimar.vendrusculo@embrapa.br*

RESUMO

Pesquisas têm demonstrado que a acidez do solo aumenta a população e os danos de *Pratylenchus brachyurus* em soja, de forma que calagem pode ser uma estratégia importante para o controle desse nematoide. Entretanto, a distribuição espacial irregular do nematoide dificulta a obtenção de dados confiáveis a respeito da eficiência das práticas de manejo de *P. brachyurus* em experimentos de campo, quando delineamentos experimentais tradicionais são adotados. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da calagem sobre a densidade populacional e os danos de *P. brachyurus* em soja, utilizando metodologia embasada na caracterização da variabilidade espacial de parâmetros de interesse em parcelas grandes alocadas dentro de talhão de produção comercial da cultura. O experimento foi realizado em lavoura comercial de soja com solo arenoso, localizada em Tapurah/MT. Foram demarcadas sete parcelas, com área de 0,84 ha cada, às quais foram aplicados os seguintes tratamentos: T1 = testemunha sem calagem; T2-1 e T2-2 = calagem na implantação do experimento (julho/2014); T3-1 e T3-2 = calagem em julho de 2014 e de 2016; T4-1 e T4-2 = calagem em julho de 2014 e de 2017. As doses de calcário dolomítico (PRNT 100%) aplicadas em 2014, 2016 e 2017 foram de 1,82; 1,69 e 1,92 t/ha, respectivamente. Na safra 2017/2018, foram quantificadas as seguintes variáveis, por meio de amostras coletadas seguindo uma grade amostral de 20 x 20 m (21 amostras por módulo): densidade populacional de *P. brachyurus* nas raízes da soja, no estádio R5.1; rendimento de grãos; e atributos químicos do solo na camada de 0-20 cm, após a colheita da soja. O índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) da soja foi avaliado no estádio 5.4, por meio de imagens de satélite. Os dados foram submetidos à análise geoestatística e, a partir dos valores krigados, foram elaborados mapas de variabilidade espacial. O rendimento de grãos da soja e o NDVI diminuíram com o aumento do intervalo de tempo desde a última calagem, seguindo a ordem decrescente T4 > T3 > T2 > T1. Quanto mais recente a calagem, menor foi a acidez do solo e a densidade populacional de *P. brachyurus*. A quantificação da variabilidade espacial dos atributos de solo, de planta e da densidade populacional de *P. brachyurus* possibilitou o estabelecimento de relações de causa-efeito entre as variáveis medidas. O rendimento de grãos da soja correlacionou-se positivamente com o NDVI, o pH, os teores de Ca e Mg e a saturação por bases (V%), e negativamente com a densidade populacional do nematoide e os teores de Al. Já a densidade populacional de *P. brachyurus* foi negativamente correlacionada com a acidez do solo, com os teores de Ca e Mg e com a V%. Os resultados obtidos demonstram que a calagem é uma importante ferramenta para o controle de *P. brachyurus*. Adicionalmente, a aplicação de tratamentos experimentais em parcelas grandes dentro de talhões de produção de soja, seguida da caracterização da variabilidade espacial dos atributos de interesse, é uma abordagem eficiente no estabelecimento de relações causa-efeito em estudos envolvendo nematoides.

Palavras-chave: calagem; saturação por bases; nematoide-das-lesões-radiculares; variabilidade espacial.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000011

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

ABSTRACT
Studies have shown that soil acidity increase the population density as well as damages caused by *Pratylenchus brachyurus* in soybean, thereby liming may be an important strategy to control this nematode. However, the irregular spatial distribution become difficult to obtain reliable data regarding the efficiency of *P. brachyurus* management practices in field experiments when traditional experimental designs are employed. Thus, this work aimed at evaluating liming effects on population density and damages caused by *P. brachyurus* in soybean, using a methodology based on determining spatial variability of response variables in large plots allocated at commercial soybean fields. The experiment was carried out in a sandy soil within a commercial soybean field placed in Tapurah, in the Mato Grosso state (MT), Brazil. Seven large plots (0.84 ha each) were delimited, and the following treatments were applied as follows: T1 = control without liming; T2-1 and T2-2 = liming in the experiment establishment (July/2014); T3-1 and T3-2 = liming in July/2014 and July/2016; and T4-1 and T4-2: liming in July/2014 and July/2017. Dolomitic lime rates (100% total neutralizing relative power) applied in 2014, 2016 and 2017 were 1.82; 1.69; and 1.92 t/ha, respectively. In 2017/2018 growing season, samples were collected following a regular sampling grid of 20 x 20 m (21 samples from each plot), aiming at determining the following variables: population density of *P. brachyurus* in soybean roots at R5.1 stage; soybean grain yield; and chemical attributes at 0-20 cm depth. The normalized difference vegetation index (NDVI) for soybean was evaluated at R5.4 stage, using satellite images. Data were subjected to geostatistical analysis and then spatial variability maps were elaborated from kriged data. Soybean yield and NDVI decreased as the time interval from the last liming increased, following the descending order T4 > T3 > T2 > T1. The more recent the liming is, the less the soil acidity and nematode population density will be. Determining the spatial variability of nematode population density and soil and plant attributes enabled the establishment of cause-effect relations among the measured variables. Soybean yields were positively correlated with NDVI, Ca and Mg contents, pH and base saturation (BS), but negatively correlated with Al and population density of *P. brachyurus*. Nematode population was also negatively correlated with BS, Ca and Mg contents. Our results demonstrated that liming is an important tool to control *P. brachyurus* in soybean. Additionally, the application of experimental treatments in large plots within commercial soybean fields was an efficient approach to establish cause-effect relations in studies involving nematodes.
Keywords: liming; base saturation; root lesion nematodes; spatial variability.

1 INTRODUÇÃO

O nematoide-das-lesões-radiculares (*Pratylenchus brachyurus*) tem causado danos elevados com perdas econômicas significativas, especialmente no Cerrado e na cultura da soja. Trata-se de um nematoide endoparasita migrador e polífago que, devido à alimentação, movimentação e injeção de toxinas no interior dos tecidos, provoca danos nas raízes da soja (Goulart, 2008). Em solos arenosos e com altas populações do nematoide, as perdas de produtividade podem atingir 50% (Franchini et al., 2014a).

Esse nematoide ocorre naturalmente na grande maioria dos solos ácidos brasileiros. Levantamentos feitos por Galbieri et al. (2014) no Mato Grosso e Perina et al. (2017) na Bahia indicaram que *P. brachyurus* foi o nematoide mais frequente nas amostras avaliadas. O aumento de sua importância está associado à intensificação dos sistemas de produção por meio da utilização de culturas com elevados fatores de reprodução, como soja, milho, feijão, algodão, sorgo e gramíneas forrageiras, a expansão agrícola para solos de textura média e arenosa, os desequilíbrios nutricionais e a ocorrência de outros patógenos de solo (Goulart, 2008; Dias et al., 2010; Franchini et al., 2018). O problema é agravado tanto pela baixa oferta de cultivares de soja tolerantes/resistentes à *P. brachyurus* quanto pela pequena contribuição do controle químico ou biológico na redução dos danos em escala de campo.

A intensidade dos danos por nematoides depende da interação entre o parasita, o hospedeiro e o ambiente (Bergamin Filho, 1995). Nesse contexto, fatores relacionados ao solo podem alterar a intensidade dos sintomas ocasionados por *P. brachyurus* em soja, por influenciarem tanto a predisposição das plantas à doença quanto a sobrevivência, disseminação, infecção, colonização e reprodução do patógeno (Kandji et al., 2001). Os dados obtidos por Franchini et al. (2014a) comprovam que fatores ambientais relacionados ao solo são tão importantes quanto a população de nematoides na definição dos danos ocasionados por *P. brachyurus* em soja. Para uma mesma população de nematoides (1.200 indivíduos por grama de raiz), as perdas de produtividade da soja variaram de 8% (288 kg/ha) a 41% (1.458 kg/ha). Assim, o correto manejo do solo pode reduzir as perdas de produtividade da soja por *P. brachyurus* em até 80%.

A acidez do solo tem sido apontada como um dos principais fatores ambientais associados aos danos de *P. brachyurus* em soja (Franchini et al., 2011; Franchini et al., 2018). De maneira geral, esses trabalhos mostraram que a intensidade dos sintomas de *P. brachyurus*, expressa pela redução de altura das plantas de soja, foi maior em áreas mais ácidas, com menores teores de

cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e maiores concentrações de alumínio (Al) tóxico. Em ambas as pesquisas não houve correlação significativa entre a densidade populacional do nematoide e os parâmetros relacionados à acidez, levando à conclusão preliminar de que a redução da intensidade dos sintomas em solos menos ácidos e com maiores teores de Ca e Mg estaria sobretudo relacionada ao aumento da tolerância da planta aos danos do nematoide. Entretanto, experimentos de casa de vegetação revelaram que a correção da acidez do solo resultou em menor fator de reprodução de *P. brachyurus*, com reduções de 50% a 80% na população de nematoides ao final dos experimentos (Franchini et al., 2014b; Debiasi et al., 2018).

Diante disso, a correção da acidez do solo por meio da calagem pode contribuir na redução dos danos de *P. brachyurus* em soja, tanto pela diminuição da densidade populacional do nematoide quando pelo aumento da tolerância das plantas, o que, entretanto, precisa ser comprovado por meio de experimentos de campo. Nesse contexto, a elevada variabilidade espacial da densidade populacional e dos danos dos nematoides, caracterizada na prática pela formação de reboleiras (Dias et al., 2010; Franchini et al., 2018), tem sido um grande obstáculo na avaliação da eficiência das diferentes práticas de manejo desse problema. A utilização de delineamentos experimentais tradicionais, com parcelas pequenas e número limitado de repetições, resulta em elevados coeficientes de variação que impedem a obtenção de conclusões estatisticamente válidas, uma vez que os efeitos dos tratamentos são menores do que a variabilidade aleatória. Uma possível estratégia para superar essas limitações, gerando resultados de pesquisa com aplicação mais abrangente, é a aplicação dos tratamentos em parcelas grandes (0,5 ha ou mais) e o monitoramento da variabilidade espacial e temporal dos parâmetros de interesse. Nessa abordagem, a variabilidade na distribuição espacial dos nematoides e dos respectivos danos deixa de ser um complicador e passa a ser utilizada a favor da obtenção de resultados de pesquisa com maior alcance em termos de aplicabilidade a campo.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da calagem sobre a densidade populacional e os danos de *P. brachyurus* em soja, por meio da caracterização da variabilidade espacial de parâmetros de interesse em parcelas grandes alocadas dentro de talhão de produção comercial da cultura.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em um talhão de produção comercial localizado na Fazenda Santa Luzia, no município de Tapurah, na região Médio-Norte de Mato Grosso (12º 29' 48'' S e 56º 07' 45'' O). O talhão tem uma área total de 91 ha e foi originalmente ocupado pela vegetação natural típica da região do Cerrado. A área vem sendo utilizada, nos últimos dez anos, para a produção das culturas de soja, milho e arroz, sob modelo de produção que envolve o cultivo contínuo da soja no verão, em sucessão ao milho ou arroz 2ª safra, culturas que são alternadas de forma que o arroz é repetido uma vez a cada três anos. O solo no local foi caracterizado como Latossolo Vermelho distrófico típico, textura arenosa (844, 22, 134 g/kg de areia, silte e argila na camada de 0-20 cm, respectivamente). A precipitação pluvial anual média é de 1.500 mm. Em parte do talhão, foi demarcada uma área de 5,88 ha (420 x 140), que foi dividida em sete parcelas de 0,84 ha (60 m x 140 m) (Figura 1). Em 20/1/2014, antes do início do estudo e da realização da primeira calagem, foram coletadas 105 amostras de solo (0-20 cm), seguindo uma grade amostral regular (25 m x 25 m), sendo 15 amostras por módulo (Figura 1), para caracterização química e física ini-

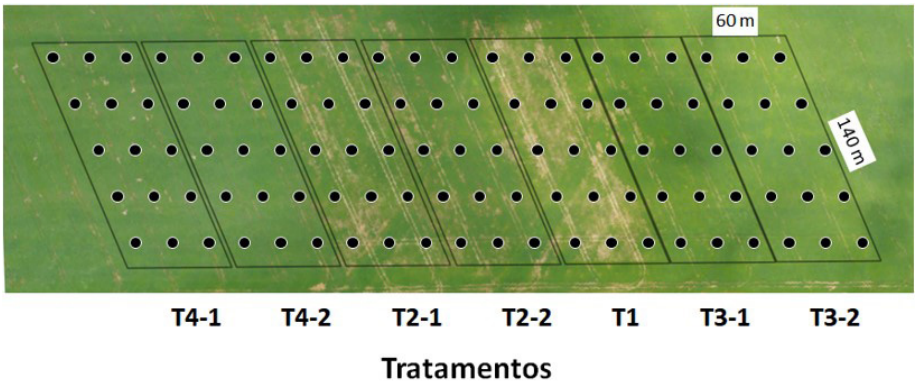


Figura 1. Distribuição espacial das parcelas e dos pontos amostrais para caracterização inicial da área de estudo em 20/1/2014. Testemunha sem calagem (T1); calagem em 2014 (T2-1 e T2-2); calagem em 2014 e 2016 (T3-1 e T3-2) e calagem em 2014 e 2017 (T4-1 e T4-2).

cial da área, bem como para a quantificação da densidade populacional de *P. brachyurus*. Cada amostra foi composta por cinco subamostras coletadas ao redor do ponto, por meio de trado do tipo holandês. As amostras coletadas foram caracterizadas quanto à textura e a composição química, conforme as metodologias descritas em Teixeira et al. (2017). Foram quantificados o pH em $CaCl_2$ 0,01M, a acidez potencial (H+Al), os teores de carbono orgânico (C), fósforo (P), potássio (K), Ca, Mg e Al, a soma de bases, a capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0 e a saturação por bases (V%).

As mesmas amostras foram utilizadas para a quantificação da população de *P. brachyurus* por meio de bioensaio em casa de vegetação. Para o bioensaio, aproximadamente 1 kg de solo de cada amostra coletada no campo foi transferido para um vaso de argila, para o qual foi transplantada uma plântula de soja da cultivar Embrapa 20. Após 60 dias de cultivo em casa de vegetação, a população de *P. brachyurus* foi estimada nas raízes de cada uma das plantas de soja, utilizando-se a metodologia de Coolen e D'Herde (1972). A população média encontrada nas raízes foi de 3.205 indivíduos/g de raiz indicando uma alta densidade populacional de nematoides na área.

A parcela mais ácida, identificada pelo menor V% na análise inicial do solo, foi mantida como testemunha sem calagem (T1) (Figura 2). A testemunha foi posicionada na região com menor V%, de forma a aumentar a amplitude de variação da acidez do solo e dos teores de Ca e Mg, que são os principais fatores em estudo. As outras seis parcelas restantes receberam calagem da seguinte forma: 2014 (T2-1 e T2-2); 2014 e 2016 (T3-1 e T3-2); e 2014 e 2017 (T4-1 e T4-2). Em cada um dos anos, duas parcelas receberam a quantidade de calcário necessária para elevar a V% para 65%, na camada de 0-20 cm. As doses de calcário dolomítico ajustadas para PRNT 100% e aplicadas nos anos de 2014, 2016 e 2017 foram de 1,82; 1,69 e 1,92 t/ha, respectivamente, e foram estabelecidas com base em resultados da análise química de solo, obtidos nas parcelas após a colheita da soja. Em 2016 e 2017, para estimar a quantidade de calcário necessária, foram coletadas 20 subamostras para compor uma amostra composta em cada parcela, logo após a colheita da soja, em meados de fevereiro, nos módulos T3 e T4. As aplicações de calcário dolomítico foram realizadas a lanço no mês de julho de cada ano, utilizando-se de distribuidor centrífugo tratorizado disponível na propriedade.

Na safra 2017/2018, quando a soja se encontrava no estádio R5.1, o que ocorreu em 13/12/2017, foram coletadas amostras de raízes para quantificação da densidade populacional de *P. brachyurus*. As amostras foram coletadas seguindo uma grade amostral regular de 20 m x 20 m, totalizando 21 amostras por módulo e 147 amostras no total. Cada amostra foi composta pelo sistema radicular de dez plantas, sendo a densidade populacional de *P. brachyurus* avaliada conforme metodologia de Coolen e D'Herde (1972). O índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) da cultura da soja foi avaliado para a data de 02/1/2018, quando a soja se encontrava no estádio 5.4, a partir das bandas 4 (vermelho) e 8 (NIR) do satélite Sentinel-2. A avaliação do rendimento de grãos da soja na safra 2017/2018 foi realizada no dia 29/01/2018 por meio da colheita mecânica (colhedora de parcelas) de três linhas de 20 m em 21 pontos por módulo, seguindo a mesma grade regular utilizada para a coleta de raízes. A massa das amostras de grãos foi quantificada, sendo os resultados expressos em sacas de 60 kg/ha após correção para 13% de umidade. Após a colheita da soja, em 21/3/2018, foram coletadas amostras de solo na camada de 0-20 cm, seguindo a mesma grade amostral utilizada para a coleta de raízes e a colheita da soja, para caracterização química do solo seguindo a metodologia descrita anteriormente.

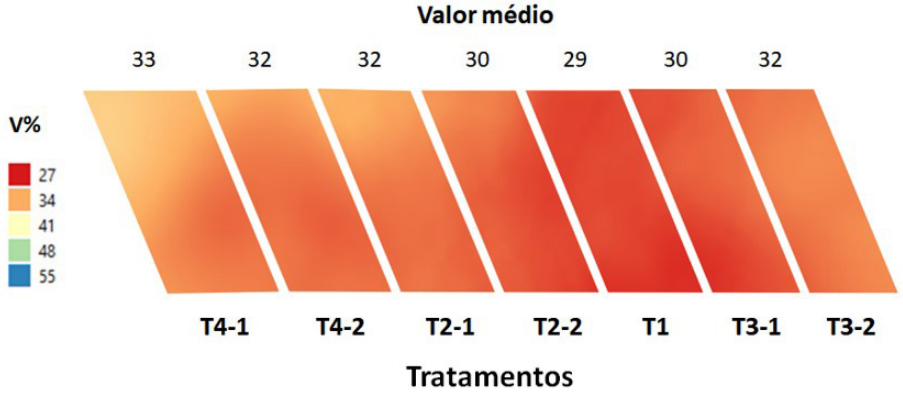


Figura 2. Distribuição espacial e valor médio da saturação por bases (V) quantificada na caracterização inicial da área de estudo em 20/1/2014. Testemunha sem calagem (T1); calagem em 2014 (T2-1 e T2-2); calagem em 2016 (T3-1 e T3-2) e calagem em 2017 (T4-1 e T4-2).

Todos os dados foram submetidos à análise geoestatística, utilizando o programa Vesper 1.6 (Minasny et al., 2005). Para cada variável, foi avaliada a existência de dependência espacial por meio da análise dos semivariogramas e ajuste de modelos teóricos (esférico, exponencial ou gaussiano). Os modelos foram selecionados com base no menor valor de AIC (*Akaike Information Criteria*), índice calculado utilizando o logaritmo da soma de quadrado residual (Akaike, 1979). Os dados de densidade populacional dos nematoides foram transformados antes da análise geoestatística, pela aplicação do logaritmo natural. A partir dos dados krigados, foram elaborados mapas de variabilidade espacial dos atributos medidos, por meio do programa Qgis (QGIS - Geographic Information System, 2022). Foram calculados os valores médios por ponto de amostragem, a partir dos valores krigados, utilizando o algoritmo de estatísticas zonais do Qgis, considerando parcelas de 20 m x 20 m (n = 147; 21 parcelas por sete módulos). A relação entre valores médios obtidos das variáveis (ex: densidade populacional de *P. brachyurus* x V%) foi determinada por meio de análise de correlação de Pearson, considerando 147 pontos por variável. A análise de regressão (teste F, $p < 0,05$) foi empregada para melhor caracterizar as relações densidade populacional de *P. brachyurus* x produtividade, V% x produtividade e V% x densidade populacional. A comparação estatística entre os valores médios das variáveis de cada tratamento (n = 7) foi realizada por meio do cálculo do erro padrão, considerando 21 parcelas (repetições) por módulo, referente ao intervalo de confiança para a média calculado pela distribuição t-Student, o que foi realizado com o auxílio do programa Excel®.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi observada dependência espacial para o rendimento de grãos da soja, a densidade populacional de *P. brachyurus*, os atributos químicos do solo e o NDVI da soja, sendo os mapas de variabilidade espacial apresentados na Figura 3. Os valores médios por parcela podem ser observados na Figura 4. O rendimento de grãos da soja diminuiu progressivamente à medida em que aumentou o intervalo de tempo desde a última calagem, seguindo a ordem decrescente T4 > T3 > T2 > T1. Acompanhando o aumento do rendimento de grãos, também foram observados aumentos progressivos do teor de Ca, do NDVI, do pH e da V% (Figuras 3 e 4). Por outro lado, foram observados decréscimos progressivos na densidade populacional de nematoides e do teor de Al trocável em função da redução do intervalo de tempo desde a última calagem. Em outras palavras, quanto mais recente a aplicação do calcário em relação à safra avaliada, maior foi o rendimento de grãos e a fertilidade e menor foi a densidade populacional de *P. brachyurus*. A calagem também aumentou o teor de Mg, porém não foi observada relação direta com a data de aplicação do calcário. O comportamento do Mg pode estar associado com a variação no teor do nutriente no corretivo aplicado nos diferentes anos, fator este não controlado durante o estudo.

As relações entre as variáveis avaliadas podem ser observadas na Tabela 1, por meio do coeficiente de correlação de Pearson (r). A densidade populacional de *P. brachyurus* nas raízes de soja foi negativamente correlacionada com os valores de pH, Ca, Mg e V%, ao passo que a correlação com os teores de Al foi positiva. Já o rendimento de grãos da soja apresentou forte correlação com o NDVI e com as variáveis relaciona-

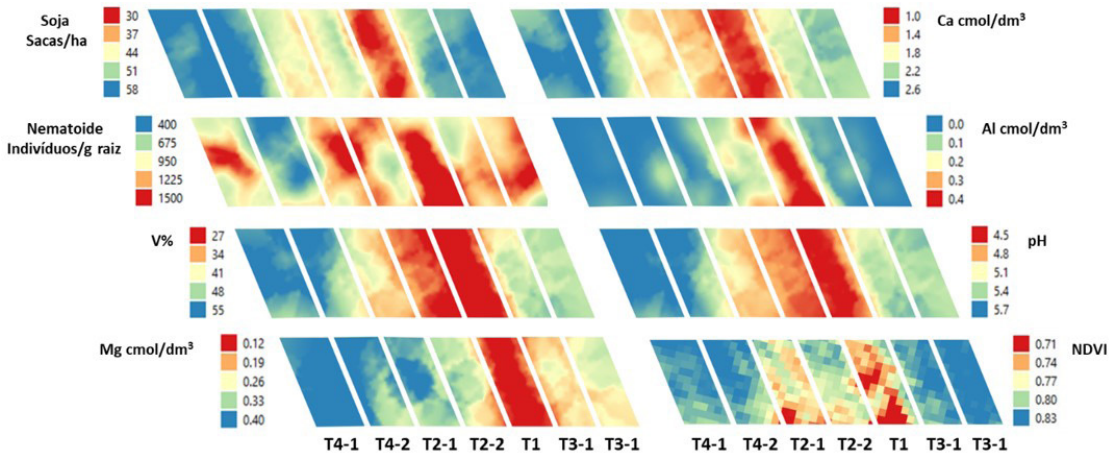


Figura 3. Distribuição espacial do rendimento de grãos da soja, da densidade populacional do nematoide *Pratylenchus brachyurus*, de parâmetros químicos do solo e do índice vegetativo por diferença normalizada (NDVI) da soja no estádio 5.4. Testemunha sem calagem (T1); calagem em 2014 (T2-1 e T2-2); calagem em 2014 e 2016 (T3-1 e T3-2) e calagem em 2014 e 2017 (T4-1 e T4-2).

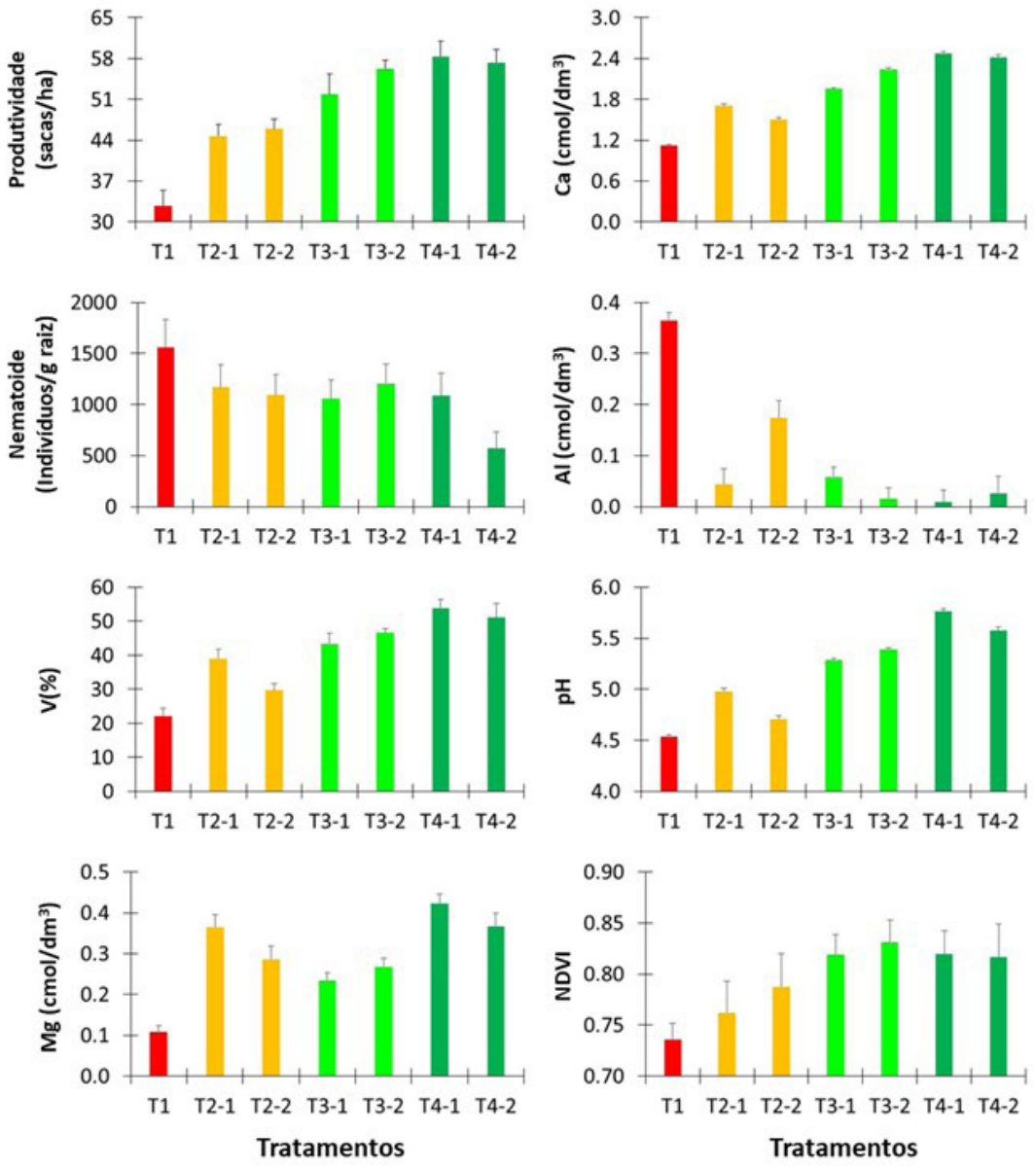


Figura 4. Valores médios por tratamento para o rendimento de grãos da soja, a densidade populacional do nematoide *Pratylenchus brachyurus*, os parâmetros químicos do solo e o NDVI da soja no estádio 5.4. Testemunha sem calagem (T1); calagem em 2014 (T2-1 e T2-2); calagem em 2014 e 2016 (T3-1 e T3-2) e calagem em 2014 e 2017 (T4-1 e T4-2).

Tabela 1. Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre o rendimento de grãos da soja, a densidade populacional do nematoide *Pratylenchus brachyurus*, os parâmetros químicos relacionados à acidez do solo e o índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) da cultura da soja no estádio 5.4.

	Rendimento de grãos da soja	População de *Pratylenchus brachyurus*	NDVI
População de *Pratylenchus brachyurus*	-0,56	-	-
NDVI	0,85	-0,49	-
pH	0,90	-0,49	0,77
Al	-0,85	0,56	-0,74
Ca	0,92	-0,54	0,78
Mg	0,69	-0,52	0,47
V%	0,91	-0,53	0,77

Todos os coeficientes de correlação de Pearson foram estatisticamente significativos ($p < 0,01$).

das à acidez do solo. O rendimento de grãos também se correlacionou negativamente com a densidade populacional de *P. brachyurus*, porém o valor absoluto de r foi menor comparativamente às demais variáveis. Houve também correlações significativas do NDVI com todas as variáveis que expressam a acidez do solo e com a densidade populacional de *P. brachyurus*, porém com magnitude, expressa pelo valor absoluto de r, menor comparativamente às correlações observadas entre a produtividade e os mesmos parâmetros.

Os dados obtidos neste trabalho indicam que *P. brachyurus* é um nematoide mais bem adaptado a solos ácidos e, dessa forma, apresenta maiores populações nas raízes da soja nessas condições, o que corrobora as conclusões de Franchini et al. (2014b) e Debiasi et al. (2018). Em consequência, a correção da acidez do solo por meio da calagem reduziu a densidade populacional de *P. brachyurus*, sendo, portanto, uma prática recomendada para o manejo do nematoide em sistemas de produção de soja. Resultados similares foram obtidos para *P. zeae* em raízes de sorgo (Trevathan et al., 1985), *P. brachyurus* em raízes de abacaxizeiro (Sarah et al., 1991) e *P. penetrans* em raízes de cerejeira (Melakeberhan et al., 1997). Entretanto, os mecanismos envolvidos na redução da população de *P. brachyurus* em função da diminuição da acidez do solo são pouco conhecidos. Sarah et al. (1991) encontraram que a população de *P. brachyurus* em raízes de abacaxizeiro aumentou mais rapidamente em áreas com maior acidez, mas as diferenças nos níveis populacionais do nematoide associadas ao pH do solo diminuíram ao longo do ciclo da cultura, desaparecendo após o florescimento. Esses resultados sugerem que o pH do solo influencia a relação planta-parasita antes ou durante a penetração das raízes; uma vez dentro da planta, o desenvolvimento do nematoide parece ser independente do pH do solo. Além disso, o pH afeta a disponibilidade de nutrientes e a composição da microbiota do solo (Andrade et al., 1995) o que, indiretamente, pode influenciar a sobrevivência, reprodução, infecção e danos de *P. brachyurus* à cultura da soja.

O rendimento de grãos da soja foi mais bem correlacionada com os parâmetros de acidez do solo do que com a densidade populacional de *P. brachyurus*. Isso revela a existência de efeitos positivos da correção da acidez na nutrição das plantas de soja, expressos pelos aumentos dos teores de nutrientes e redução do Al tóxico. Outro aspecto envolvido na resposta positiva da soja à calagem pode estar relacionado ao aumento da tolerância das plantas aos danos de *P. brachyurus*. Um ambiente químico com baixa acidez, ausência de Al tóxico e teores adequados de Ca e Mg favorece a disponibilidade de nutrientes e o crescimento das raízes da soja (Bortoluzzi et al., 2014), o que contribui para maior absorção de água e melhor nutrição das plantas compensando, ao menos em parte, os danos ocasionados pelo parasitismo dos nematoides. O aumento da tolerância da soja a *P. brachyurus* em ambientes com menor acidez de solo foi relatado por Franchini et al. (2018), que associaram a formação de reboleiras de plantas exibindo sintomas mais intensos a áreas com menor pH, maiores teores de Al e menores teores de Ca e Mg.

As análises de regressão apresentadas na Figura 5 permitem particionar os efeitos da calagem sobre o rendimento de grãos da soja em dois: 1) diretos, relativos à melhor nutrição das plantas e ao aumento de sua tolerância aos danos dos nematoides; e 2) indiretos, relacionados à redução da densidade populacional de *P. brachyurus*. Em conformidade com os demais resultados (Figuras 3 e 4 e Tabela 1), o rendimento de grãos da soja aumentou linearmente com o incremento da V% (Figura 5a). A equação demonstra que alterações na V% responderam por 83% da variação do

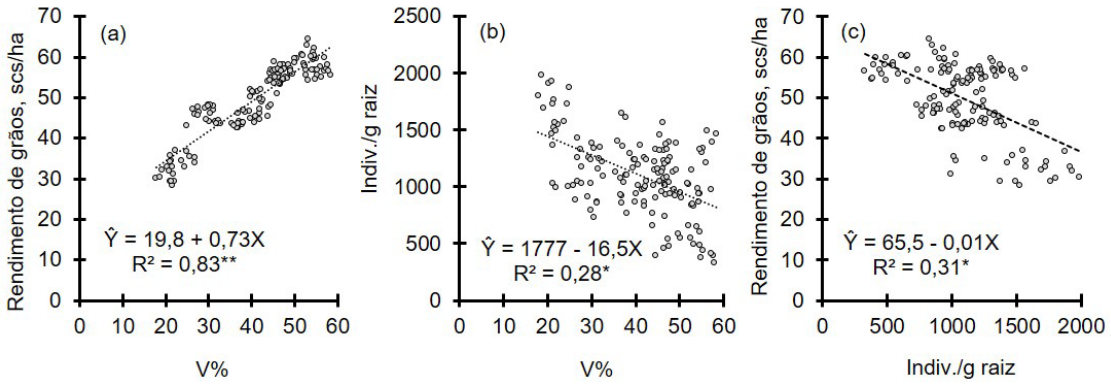


Figura 5. Relações entre a saturação por bases (V%) e o rendimento de grãos da soja (a), entre a V% e densidade populacional (Indiv./g raiz) de *Pratylenchus brachyurus* nas raízes da soja no estádio R5.1 (b), e entre a densidade populacional do nematoide e o rendimento de grãos da soja (C), estimadas a partir de dados obtidos em experimento conduzido em talhão de produção comercial de soja no município de Tapurah/MT. ** e * indicam equações estatisticamente significativa pelo teste F a 1% e 5% de probabilidade de erro, respectivamente.

rendimento de grãos da soja, que cresceu 7,3 scs/ha a cada 10% de aumento dos valores de V%. Por sua vez, a densidade populacional de *P. brachyurus* diminuiu linearmente com o aumento da V% (Figura 5b). A taxa de decréscimo foi de 165 nematoides/g de raiz a cada 10% de incremento na V%. Houve também relação linear decrescente entre a densidade populacional do nematoide e o rendimento de grãos da soja, com uma taxa de redução de 1 sc/ha a cada aumento de 100 indivíduos/g de raiz (Figura 5c). Utilizando a equação da Figura 5c, tem-se que uma redução de 165 nematoides/g raiz, estimada para um aumento de 10% na V% (Figura 5b), resulta em um aumento de 1,65 scs/ha, valor este que representa a parcela do efeito da redução da acidez na produtividade da soja explicada pela diminuição da população de *P. brachyurus*. Ou seja, os efeitos indiretos da calagem responderam por 22,6% do aumento de 7,3 scs/ha na produtividade da soja ocasionado pelo incremento de 10% na V%, ao passo que os efeitos diretos foram responsáveis por 77,4%. Assim, a maior parte do aumento do rendimento de grãos da soja ocasionado pela correção da acidez do solo via calagem deveu-se aos impactos positivos dessa prática sobre a nutrição e a tolerância das plantas aos danos de *P. brachyurus*.

O NDVI da cultura da soja foi mais bem relacionado com o rendimento de grãos, seguido pelos parâmetros químicos, do que com a densidade populacional de *P. brachyurus*, reforçando que o nematoide teve papel menor na definição do vigor da planta quando comparado com os parâmetros de fertilidade do solo (Tabela 1). A forte correlação entre o NDVI e o rendimento de grãos da soja reforça a aplicabilidade desse índice de vegetação no contexto da agricultura de precisão, proporcionando a delimitação de regiões homogêneas para direcionar a amostragem de solo e plantas visando identificar e manejar de forma localizada fatores limitantes ao desenvolvimento das plantas, conforme indicado por Damian et al. (2020). Além disso, os resultados demonstram o potencial do NDVI na estimativa do rendimento de grãos da soja, corroborando outros trabalhos (Esquerdo et al., 2011; Johnson, 2014; Johnson et al., 2021). Por outro lado, os resultados deste trabalho comprovam a grande dificuldade em se utilizar o NDVI como indicador direto e único da variabilidade espacial de atributos de solo ou problemas específicos, uma vez que diversos fatores alteram, simultaneamente, o vigor das plantas (Tabela 1).

A variabilidade espacial dos atributos de solo, de planta e da densidade populacional de *P. brachyurus*, associada à elevada amplitude de variação dos valores observados, possibilitou o estabelecimento de relações de causa-efeito entre as variáveis medidas, conforme demonstrado na Tabela 1 e na Figura 5. Assim, a abordagem metodológica utilizada neste trabalho, que envolve a aplicação de tratamentos experimentais em parcelas grandes dentro de talhões de produção comercial, seguida da caracterização da variabilidade espacial dos atributos e indicadores de interesse e do estabelecimento de relações matemáticas entre eles, demonstrou ser eficiente em estudos envolvendo estratégias de controle de nematoides, cuja população e distribuição são amplamente variáveis e concentradas em determinadas regiões do talhão, as reboleiras.

4 CONCLUSÕES

1) A correção da acidez do solo por meio da calagem constitui-se em importante estratégia de manejo visando a redução da densidade populacional e dos danos de *P. brachyurus* na cultura da soja.
2) A aplicação de tratamentos experimentais em grandes parcelas dentro de talhões de produção comercial de soja, seguida da caracterização da variabilidade espacial dos atributos de interesse com aplicação de métodos geoestatísticos, é uma abordagem eficiente no estabelecimento de relações causa-efeito em estudos envolvendo nematoides.

AGRADECIMENTOS

Ao Fundo de Apoio à Cultura da Soja (Facs) e à Associação dos Produtores de Soja e Milho do Estado de Mato Grosso (Aprosoja/MT), pelo apoio técnico e financeiro ao desenvolvimento deste trabalho. Ao Dr. Waldir Pereira Dias, pesquisador aposentado da Embrapa Soja, pela realização das análises nematológicas. Ao Sr. Adriano Mattana, por permitir a realização do trabalho de campo em talhão da Fazenda Santa Luzia, de sua propriedade.

REFERÊNCIAS

AKAIKE, H. A Bayesian extension of the minimum AIC procedure of autoregressive model fitting. **Biometrika**, v. 66, n. 2, p. 237-242, 1979. DOI: http://doi.org/10.1093/biomet/66.2.237.

ANDRADE, D. S.; COLOZZI-FILHO, A.; PAVAN, M.A.; BALOTA, E.L.; CHAVES, J.C.D. Atividade microbiana em função da calagem em um solo cultivado com cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.191-196, 1995.

BERGAMIN FILHO, A. Epidemiologia: conceitos e benefícios. In: BERGAMIN FILHO, A.; KIMATI, H.; AMORIM, L. (ed.). **Manual de fitopatologia**: princípios e conceitos. São Paulo: Agronômica Ceres, 1995. v. 1, p. 540-553.

BORTOLUZZI, E. C.; PARIZE, G. L.; KORCHAGIN, J.; SILVA, V. R; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Soybean root growth and crop yield in reponse to liming at the beginning of a no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p., 262-271, 2014. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100026.

COOLEN, W. A.; D'HERDE, C. J. **A method for the quantitative extraction of nematodes from plant tissue**. Gent: State Agricultural Research Center, 1972. 77 p.

DAMIAN, J. M.; PIAS, O. H. C.; CHERUBIN, M. R.; FONSECA, A. Z.; FORNARI, E. Z.; SANTI, A. L. Applying the NDVI from satellite images in delimiting management zones for annual crops. **Scientia Agrícola**, v. 77, n. 1, p. e20180055, 2020. DOI: http://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0055.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; DIAS, W. P.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; RAMOS JUNIOR, E. U.; OLIVEIRA JUNIOR, A. Calagem diminui a densidade populacional do nematoide das lesões radiculares em solos com texturas contrastantes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, 8., 2018, Goiânia. **Inovação, tecnologias digitais e sustentabilidade da soja:** anais**.** Brasília, DF: Embrapa, 2018. p. 829-831.

DIAS, W. P.; ASMUS, G. L.; SILVA, J. F. V; GARCIA, A.; CARNEIRO, G. E. S. Nematoides. In: ALMEIDA, A.M.R.; SEIXAS, C.D.S. Nematoides. In: ALMEIDA, A.M.R.; SEIXAS, C.D.S. (ed.) **Soja:** doenças radiculares e de hastes e interrelações com o manejo do solo e da cultura. Londrina: Embrapa Soja, 2010. p.173-206.

ESQUERDO, J. C. D. M.; ZULLO JÚNIOR, J.; ANTUNES. J. F. G. Use of NDVI/AVHRR time-series profiles for soybean crop monitoring in Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, p. 3711-3727, 2011.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; DIAS, W. P.; RAMOS JUNIOR, E. U.; BALBINOT JUNIOR, A. A. Densidade populacional do nematoide das lesões radiculares em soja e sua relação com a calagem. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA, 34., Londrina. **Resumos expandidos...** Londrina: Embrapa Soja, 2014b. p. 158-160.

FRANCHINI, J. C. et al. Perda de produtividade da soja em área infestada por nematoide das lesões radiculares na região médio norte do Mato Grosso. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2014a. p. 274-278.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; DIAS, W. P.; RAMOS JÚNIOR., E. U.; SILVA, J. F. V. Relação entre atributos de solo, população de nematoide das lesões radiculares e crescimento de plantas de soja. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 1, p. 30-35, 2018. DOI: http://doi.org/10.5965/223811711712018030.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; DIAS, W. P. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo e da população de Pratylenchus brachyurus. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (ed.). **Agricultura de precisão**: um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 157-161.

GALBIERI, R.; SILVA, J.; ASMUS, G.; VAZ, C.; LAMAS, F.; CRESTANA, S.; TORRES, E. D.; FARIAS, A.; FALEIRO, V. O.; CHITARRA, L. G.; RODRIGUES, S. M.; STAUT, L. A.; MATOS, E. S.; SPERA, S. T.; DRUCK, S.; MAGALHÃES, C. A. S; OLIVEIRA, A. A. E.; TACHINARDI, R.; FANAN, S.; SANTOS, N. R. R.; SANTOS, T. **Áreas de produção de algodão em Mato Grosso:** nematoides, murcha de Fusarium, sistemas de cultivo, fertilidade e física de solo. Cuiabá: Instituto Mato-grossense do Algodão, 2014. 16 p.

GOULART, A. M. C. **Aspectos gerais sobre nematoides das lesões radiculares (gênero Pratylenchus)**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008.

JOHNSON, D. M. An assessment of pre- and within-season remotely sensed variables for forecasting corn and soybean yields in the United States. **Remote Sensing of Environment**, v. 141, p. 116-128, 2014. DOI: http://doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.027.

JOHNSON, D. M.; ROSALES, A.; MUELLER, R.; REYNOLDS, C.; FRANTZ, R.; ANYAMBA, A.; TUCKER, C. USA crop yield estimation with MODIS NDVI: are remotely sensed models better than simple trend analyses? **Remote Sensing**, v. 13, n. 21, p. 4227, 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/rs13214227.

KANDJI, S. T.; OGOL, C. K. P. O.; ALBRECHT, A. Diversity of plant-parasitic nematodes and their relationships with some soil physico-chemical characteristics in improved fallows in western Kenya. **Applied Soil Ecology**, v. 18, n. 2, p. 143-157, 2001. DOI: http://doi.org/10.1016/S0929-1393(01)00157-3.

MELAKEBERHAN, H.; BIRD, G. W.; GORE, R. Impact of plant nutrition on Pratylenchus penetrans infection of Prunus avium rootstocks. **Journal of Nematology**, v. 29, n. 3, p. 381-388, 1997. PMid:19274171.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. **Vesper 1.62 – spatial prediction software for precision agriculture**. Sidney: Australian Centre for Precision Agriculture (ACPA), University of Sydney, 2005.

PERINA, F. J.; BOGIANI, J. C.; RIBEIRO, G. C.; BREDA, C. E.; FABRIS, A.; SANTOS, I. A. SEIBEL, D. P. **Levantamento e Manejo de Fitonematoides em Algodoeiro no Oeste da Bahia, resultados safra 2016/2017**. Luís Eduardo Magalhães: Fundação Bahia/ABAPA/IBA/Embrapa, 2017. 8 p.

QGIS - GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM. **Open Source Geospatial Foundation Project**, 2022 Disponível em: http://qgis.org. Acesso em: 02 ago. 2022.

SARAH, J. L.; OSSÉNI, B.; HUGON, R. Effect of soil pH on development of Pratylenchus brachyurus populations in pineapple roots. **Nematropica**, v. 21, p. 211-216, 1991.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. P. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 573 p.

TREVATHAN, L. E.; CUAREZMA-TERÁN, J. A.; GOURLEY, L. M. Relationship of plant-nematodes and edaphic factors in Colombian grain sorghum production. **Nematropica**, v. 15, n. 2, p. 145-153, 1985.

45

Variabilidade espacial da distribuição de fertilizantes de dosadores de rosca helicoidal por gravidade e por transbordo e sua influência na cultura da soja

Spatial variability of fertilizer distribution from gravity and transshipment screw dosing systems and their influence on soybean crop

David Peres da Rosa[1], Júlio Tagliari Balestrin[2], Roger Toscan Spagnolo[3]

[1] *Professor e Pesquisador, Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS), Campus Sertão, Sertão (RS), Brasil, david.darosa@sertao.ifrs.edu.br*

[2] *Mestrando em Fitotecnia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq), Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba (SP), Brasil, juliotbalestrin@usp.br*

[3] *Professor e Pesquisador, Centro de Engenharias (Ceng), Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas (RS), Brasil, roger.toscan@gmail.com*

RESUMO

Agricultura de precisão (AP) no Brasil vem trabalhando muito fortemente na correção da variabilidade espacial da fertilidade do solo, fruto da criação da maioria das empresas de assistência técnica na área de AP. Nessa ação, o processo de deposição de fertilizantes realizado no momento da semeadura é de suma relevância para a produtividade das culturas agrícolas, visto que exerce significativa influência no desenvolvimento da cultura. Nesse contexto, os dosadores de fertilizantes são os responsáveis pela deposição, porém, os modelos disponíveis no mercado apresentam alta variação da dosagem. Diante do exposto, o objetivo deste capítulo é comparar a qualidade espacial da distribuição de fertilizante de dois tipos de dosadores, dosador de rosca helicoidal por gravidade e por transbordo, e suas influências no desenvolvimento da cultura da soja. O experimento foi realizado em uma área de 2,2 ha dividida em quatro talhões (tratamentos), com tratamentos baseados na distribuição de fertilizantes por: 1) dosador helicoidal por transbordo e dosador helicoidal por gravidade, nas doses de 310 e 400 kg ha^{-1}. As variáveis analisadas foram: coeficiente de variação da distribuição de fertilizante, altura das plantas, número de entrenós das plantas, massa seca da parte aérea e das raízes das plantas de soja. O dosador de rosca helicoidal por transbordo apresentou menor coeficiente de variação de distribuição de fertilizante e maior homogeneidade na altura das plantas, no número de nós das plantas, na massa seca da parte aérea e das raízes em comparação ao dosador de rosca helicoidal por gravidade nas duas doses de fertilizantes testadas. De maneira geral, constatou-se que, à medida que se aumenta a dose de fertilizante, diminui-se a variabilidade da distribuição dos fertilizantes. Essa diminuição ocorreu de maneira ainda mais pronunciada no dosador de rosca helicoidal por transbordo. Portanto, o dosador de rosca helicoidal por transbordo apresentou superioridade em relação ao dosador por gravidade nas condições experimentais do presente estudo.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merrill.; soja; dosagem de fertilizantes; dosadores de fertilizantes.

ABSTRACT

Precision agriculture (PA) in Brazil has been working very hard to correct the spatial variability of soil fertility, as a result of the creation of most PA technical assistance companies. The process of deposition of fertilizers, carried out at the time of sowing, is of paramount importance for soybean productivity, since it exerts a significant influence on the agricultural crop development. In this context, fertilizer metering plays a very important role, given that they are responsible for dosing fertilizers. The present study aimed to compare two types of fertilizer metering (gravity and helical screw dosing system for transshipment) and their influence on soybean crop. The experiment was carried out in an area of 2.2 ha divided into four plots (treatments) as follows: 1) helical screw dosing system

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000010

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

for transshipment at a rate of 310 kg ha^{-1}; 2) helical gravity screw dosing system at a rate of 310 kg ha^{-1}; 3) helical screw dosing system for transshipment at a rate of 400 kg ha^{-1}; and 4) helical gravity screw dosing system at a rate of 400 kg ha^{-1}. The variables analyzed were as follows: coefficient of variation of fertilizer distribution, plant height, number of plant internodes, shoot and root dry mass of soybean plants. The helical screw dosing system for transshipment showed a lower coefficient of variation of fertilizer distribution and greater homogeneity in plant height, in the number of plant nodes, in the dry mass of shoots and roots of soybean plants compared to the helical gravity screw dosing system in the two tested fertilizer rates (310 kg ha^{-1} and 400 kg ha^{-1}). In general, it was found that as the fertilizer dose increases, the variability of fertilizer distribution decreases. This decrease was even more pronounced in the helical screw dosing system for transshipment. Therefore, the helical screw dosing system for transshipment showed superiority in relation to the gravity dosing system in the experimental conditions of the present study.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merrill.; soybean; spatial variability; fertilizer dosing system.

1 INTRODUÇÃO

Para que as plantas tenham crescimento e desenvolvimento apropriado, é necessário que no solo estejam disponíveis nutrientes com qualidade e quantidade suficientes para absorção correta das raízes, possibilitando assim que as plantas atinjam o máximo potencial produtivo. Atualmente, o Brasil é responsável por cerca de 8% do consumo global de fertilizantes, sendo o quarto do mundo, atrás apenas da China, Índia e Estados Unidos. O potássio com 38% é o principal nutriente aplicado no Brasil, seguido por cálcio com 33% e nitrogênio com 29%. A cultura mais cultivada no país é a soja, que demanda mais de 40% dos fertilizantes aplicados (Brasil, 2021).

Na produção dessa cultura, técnicas de agricultura de precisão cada vez mais são difundidas nas propriedades, focando a correção da variabilidade espacial da fertilidade do solo, entretanto, a forma de realizar essa correção está no processo de fertilização do solo, realizada via semeadora-adubadora ou por distribuidor centrífugo. Em ambos processos temos problemas de distribuição, que são influenciados pela inclinação de trabalho, velocidade de acionamento do mecanismo dosador e a granulometria do fertilizante (Reynaldo; Gamero, 2015; Spagnolo *et al*., 2020).

Na distribuição via sulco de semeadura, os dosadores utilizados no Brasil possuem um pulso na sua dosagem, que resulta na variação da distribuição linear do fertilizante (Rosa *et al*., 2013). Essa variação pode alcançar 75% quando se utilizam dosadores com rosca helicoidal por gravidade, e 40% no rosca helicoidal por transbordo longitudinal (Rosa *et al*., 2019), dosadores encontrados em mais de 92,2% do mercado brasileiro (Weirich Neto *et al*., 2015). Esses dosadores são disponíveis em quatro tipos (Spagnolo *et al*., 2018): rosca helicoidal por gravidade, ou por transbordo longidutinal, transbordo transversal ou rosca dupla, configurações que resultam em diferentes desempenho.

O pulso de dosagem ocorre ao completar uma volta completa do helicoide: a rosca se descarrega numa velocidade maior que a de carregamento, resultando assim numa "falha" de dosagem, fatores que, segundo Rosa *et al.* (2013), no dosador por transbordo longitudinal são menos intensos que no dosador por gravidade. A declividade, umidade do fertilizante (Rosa *et al.*, 2017), trepidação e as doses empregadas (Pagnussat *et al*., 2014) interferem também na regularidade de distribuição, aumentando ou diminuindo o coeficiente de variação da distribuição.

Tais oscilações de dosagem podem interferir diretamente na produtividade, consequentemente, na rentabilidade do agricultor, pois nos pontos de excesso de fertilizante na linha poderá ocorrer danos à semente ou ao seu sistema radicular, bem como, ao contrário, a falta de fertilizante não irá suprir adequadamente as necessidades da planta, limitando o rendimento. Tais problemas nessa etapa da produção, a semeadura, muitas vezes não são recuperados ao longo de todo ciclo da cultura, comprometendo dessa forma o rendimento de grãos.

A variabilidade espacial de distribuição de fertilizante no solo, bem como temporal da fertilidade, pode resultar em perdas de rendimento de grãos, aumentando os custos de produção e o impacto ao meio ambiente. Isso vem ocorrendo nas áreas ano após ano, acarretando em uma grande heterogeneidade tanto de planta quanto de solo, visto que são gerados pontos de alta e de baixa deposição de fertilizante ao longo da área.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo comparar o desempenho espacial de dois tipos de dosadores de fertilizantes de semeadora (dosador de rosca helicoidal por gravidade e por transbordo) e sua influência na cultura da soja.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em um Latossolo Vermelho (Embrapa, 2018) manejado em sistema plantio direto, localizado na área experimental do CETEC Fertisystem® em Passo Fundo/RS, instalado

na safra 2016/2017 na cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill.). A área do experimento possui relevo levemente ondulado a ondulado, sendo uma área delimitada por terraços de base larga.

Utilizando uma área experimental de 2,2 ha, foram divididos quatro talhões com áreas semelhantes, onde cada talhão recebeu um tratamento diferente baseado em dose e tipo de dosador, sendo: 1) dosagem de fertilizante via dosador helicoidal por transbordo na dose de 310 kg ha^{-1}; 2) dosagem de fertilizante via dosador helicoidal por gravidade na dose de 310 kg ha^{-1}; 3) dosagem de fertilizante via dosador helicoidal por transbordo na dose de 400 kg ha^{-1}; e 4) dosagem de fertilizante via dosador helicoidal por gravidade na dose de 400 kg ha^{-1}. Ambos os dosadores utilizaram rosca de passo de 50,8 mm.

A semeadora utilizada foi da marca Semeato® modelo PD21, configurada com 9 linhas de espaçamento 0,45 m, o fertilizante usado possuía fórmula N-P_2O_5-K_2O 02-23-23. Para tracionar a semeadora, utilizou-se um trator da marca Massey Fergusson®, modelo 4292, com 105cv de potência nominal, com tração dianteira assistida (TDA). Para os tratamentos fitossanitários, empregou-se um pulverizador autopropelido da marca Kuhn®, modelo Parruda, de 2.000 L e 27 m de barra. Para georreferenciamento dos talhões e delimitação dos pontos de coleta, utilizou-se um GNSS marca Gamin®, modelo Etrex 20.

As variáveis analisadas foram coeficiente de variação da distribuição linear de fertilizante, altura das plantas, número de entrenós das plantas, massa seca da parte aérea e das raízes das plantas de soja.

No teste de distribuição, empregou-se a metodologia desenvolvida por Rosa *et al.* (2019), em cada ponto de avaliação foi disposta uma calha de aço carbono de 6 m de comprimento e demais dimensões determinadas para segurar potes coletores (0,09 m x 0,09 m) dispostos lado a lado, ao longo desse trajeto. Essa calha foi disposta nos pontos georreferenciados de coleta em cada talhão, sendo coletadas 528 amostras de fertilizante em cada talhão. Na semeadora foram retirados os limitadores de profundidade das duas linhas centrais (apenas os internos) para deixar um espaço maior da calha até as linhas do implemento.

Em cada ponto de referencia, foram avaliadas as plantas dispostas em 5 m, em duas linhas, retiradas do solo após seccionadas as raízes da planta. Para a quantificação da massa seca das raízes, as raízes foram lavadas em água corrente e em seguida secas em estufas com circulação de ar forçado a 65ºC até apresentarem massa constante. Tais avaliações foram realizadas no momento de florescimento da cultura.

O processamento dos dados foi realizado em planilha eletrônica, para após serem processados pelo software Campeiro 7.35 para a avaliação geoestatística e a confecção dos mapas de isolinhas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O dosador de rosca helicoidal por transbordo proporcionou um menor coeficiente de variação (maior homogeneidade) de distribuição de fertilizante (Figura 1A) quando a dosagem foi de 310 kg ha^{-1}, variando apenas em duas das quatro classes do mapa de isolinhas; na classe de 30,85% a 43,41%, o CV ocorreu em 84,85% da área, o restante ficou entre 43,41% e 55,97%. Nessa mesma dosagem, no dosador de rosca helicoidal por gravidade (Figura 1B) observou-se maior heterogeneidade na deposição de fertilizante. A maior parte do talhão (61,02%) apresentou um CV que variou entre 55,97% e 66,53%, e 35,59% da área apresentou CV de 68,53% a 81,09%, e apenas 3,4% de área com CV de 43,41% a 55,97%, demonstrando variabilidade espacial alta e ampla variação dos níveis de CV.

As diferenças podem ser explicadas pelo ciclo da rosca helicoidal, que, ao completar uma volta, o dosador descarrega-se e fica por uma fração de tempo sem fertilizante, gerando o chamado "pulso da distribuição" (Rosa *et al.*, 2013).

Quando houve aumento da dose de fertilizante (400 kg ha^{-1}), constatou-se que o dosador de rosca helicoidal por transbordo apresentou um CV de distribuição variando de 30,85% a 43,41% em 65,38% da área, e o restante dessa ficou na classe de 43,41% a 55,97%. Já no dosador de rosca helicoidal por gravidade, a variação foi de 55,97% a 68,53% em 59,5% da área, e de 43,41% a 55,97% no restante da área. Isso demonstra que o dosador de rosca helicoidal por gravidade apresentou maior heterogeneidade de distribuição em comparação ao dosador de rosca helicoidal por transbordo também na dose de 400 kg ha^{-1} de fertilizante.

O aumento da dose de fertilizante de 310 kg ha^{-1} (Figuras 1A e 1B) para 400 kg ha^{-1} (Figuras 1C e 1D) gerou uma redução no CV de distribuição. De acordo com Rosa *et al.* (2013), à medida que se aumenta a velocidade de rotação da rosca helicoidal, diminuem-se os pulsos. Segundo Portella *et al.* (1998), o CV de distruibuição de dosadores de fertilizantes de rosca helicoidal pode passar de 50%, conforme haja alteração de vazão ou de velocidade de trabalho.

A redução do CV da distribuição com o aumento da dose está de acordo com o estudo de Ferreira *et al.* (2007), que concluíram que a maior velocidade de acionamento do dosador melhora a distribuição de fertilizante.

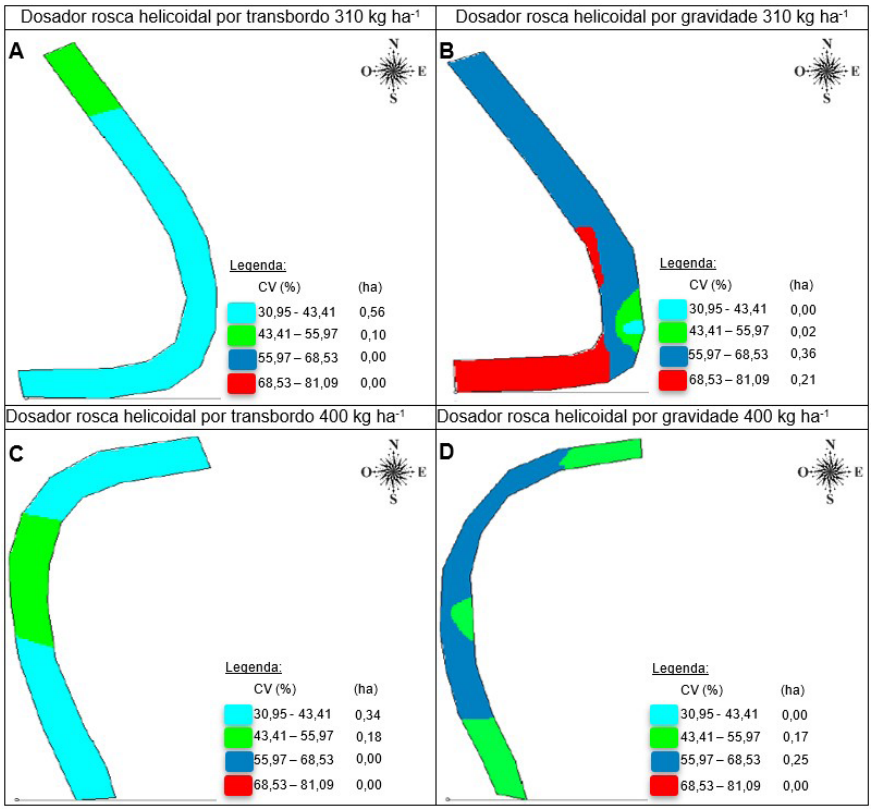


Figura 1. Distribuição espacial do coeficiente de variação (CV) da distribuição de fertilizante do dosador de rosca helicoidal por transbordo nas doses de 310 kg ha^{-1} (A) e 400 kg ha^{-1} (C) e do dosador de rosca helicoidal por gravidade nas doses de 310 kg ha^{-1} (B) e 400 kg ha^{-1} (D).

A maior velocidade induz a um carregamento e descarregamento do helicoide mais rápido, encobrindo o pulso pela maior quantidade de fertilizante dosado e menor tempo entre um e outro.

A variabilidade espacial (Tabela 1) foi elevada para boa parte dos parâmetros em análise, pois tivemos baixos coeficientes de ajuste (R^2), exceto alguns parâmetros em alguns tratamentos. Quanto mais próximo a zero forem os coeficientes de assimetria e curtose do CV, maior semelhança à distribuição normal. Neste sentido, o CV em ambos dosadores e doses não apresentam distribuição normal; ainda no dosador por gravidade, o CV médio dos dados foi de 142,21%, corroborando para a variabilidade visual nos mapas de isolinhas apresentados.

Quanto à altura das plantas de soja, é possível observar que o dosador de rosca helicoidal por transbordo apresentou altura concentrando nas três últimas faixas, sendo que 46,96% da área estão de 66,09 cm a 69,25 cm, e 40,90% entre 62,89 cm e 66,09 cm (Figura 2A). Já no dosador de rosca helicoidal por gravidade, houve maior variação da área, apresentando plantas nas quatro classes de altura, concentrando 50% da área na 3ª classe, de 62,89 cm a 66,09 cm (Figura 2B).

O dosador de rosca helicoidal por transbordo proporcionou menor variabilidade e também maior área com plantas mais altas, as quais podem favorecer a produtividade. Segundo estudos de Rosa *et al.* (2013), nos dosadores de rosca helicoidal por gravidade o pulso na sua dosagem acarreta na desuniformidade das plantas que interferirá diretamente na produção.

Quando houve aumento da dose de fertilizante, novamente o dosador de rosca helicoidal por transbordo ocasionou uma variação em apenas três classes de altura, sendo que a faixa de altura que representou maior área (69,2%) foi a de 59,69 cm a 62,89 cm e, em seguida, a faixa de 62,89 cm a 66,09 cm com 26,92% da área e, por último, a faixa 56,49 cm a 59,69 cm com apenas 3,8% de área (Figura 2C). Na rosca helicoidal por gravidade, também variou em apenas três classes de altura, porém teve uma distribuição mais uniforme entre elas (Figura 2D). Vale ressaltar que o ideal seria ter a área com menor variação e maior concentração de plantas mais altas.

Comparando as duas doses, constatou-se novamente que, quando a dose de fertilizante aumenta, a heterogeneidade dos talhões diminui. Pagnussat *et al.* (2013), estudando diferentes doses de fertilizante em dosadores de rosca helicoidal, em experimento com agricultura convencional, constataram que quanto maior a

Tabela 1. Dados estatísticos e geoestatísticos dos parâmetros em análise no teste com dosador rosca helicoidal por transbordo (DHt) e helicoidal por gravidade (DHg) nas doses 310 e 400 kg ha^{-1}.

Dosad.[1]	Dose	Parâm.	Ass	Curt	CV med	RSS	R^2	Mod	A	C0	C0+C
DHt	400	CV	1,62	1,6	37,69	38652	0,48	Gaus	138,7	19,07	311,10
	310		-0,28	-0,81	0,11	15322	0,57	Lin	60,26	6922,8	50122,07
DHg	400		0,31	-1,15	16,8	0,107	0,36	Gaus	365,29	0,10	2,07
	310		-1,1	0,79	142,21	0,13	0,31	Lin	80,34	0,10	0,10
DHt	400	Altura	-1,58	1,36	3,47	69,7	0,61	Gaus	150,69	0,01	21,01
	310		-0,11	-1,51	3,8	0,01	0,14	Exp	632,7	0,10	0,39
DHg	400		0,74	-1,02	13,23	0,01	0,86	Gaus	165,24	0,02	0,58
	310		-1,16	0,57	15,53	514	0,14	Esf	53,3	2,68	15,26
DHt	400	Entrenó	-0,6	-0,89	1,5	3,31	0,29	Gaus	24,08	0,00	1,47
	310		-1,77	1,96	0,579	0,02	0,18	Esf	41,4	0,00	0,08
DHg	400		-0,78	-0,6	0,44	0,09	0,83	Gaus	122,98	0,00	0,3
	310		0,07	-0,96	1,3	0,554	0,51	Gaus	30,31	0,00	1,02
DHt	400	Massa seca foliar	0,47	-1,2	4,73	28,7	0,38	Gaus	79,67	3,45	8,52
	310		0,13	-1,49	0,87	0,01	0,19	Lin	86,09	0,15	0,15
DHg	400		0,65	-0,64	4,01	0,108	0,29	Gaus	365,29	0,04	1,25
	310		0,45	-0,29	6,54	206	0,17	Gaus	15,07	0,01	8,10
DHt	400	RG	-1,04	-0,45	0,12	0,05	0,39	Lin	74,8	0,11	0,11
	310		-0,28	-0,81	0,34	0,01	0,6	Gaus	215,81	0,10	0,82
DHg	400		-0,08	-0,99	0,12	0,004	0,8	Gaus	61,31	0,00	0,13
	310		0,42	-1,22	0,13	0,03	0,22	Esf	17,8	0,00	0,14
DHt	400	Massa seca radicular	0,1	-1,69	0,02	0,001	0,84	Gaus	90,76	0,00	0,07
	310		0,95	-0,45	0,01	0,12	0,39	Lin	76,47	0,18	0,18
DHg	400		-0,45	-0,68	0,02	0,02	0,12	Lin	85,63	0,13	0,13
	310		-0,34	-1,38	0,02	0,002	0,261	Exp	632,7	0,00	0,09

[1]Dosad.: Dosador; Ass: assimetria; Curt: curtose; RSS: raiz do erro quadrado; Mod: modelo; A: alcance; C0: efeito pepita; C0+C: patamar; RG: rendimento de grãos.

dose utilizada, menor é o CV na distribuição de fertilizante, resultando assim em menor variabilidade da fertilidade na linha de plantio.

Altura de plantas também não apresentou uma distribuição normal, e analisando os coeficientes de assimetria e curtose (Tabela 1), o CV dos dados foi baixo, no máximo 15,53%, que para Ogunkunle (1993) é menos variável quando está entre 0% e 15%, já de 15% a 35% é moderadamente variável, e maior que 35% altamente variável. Isso corrobora o elevado alcance encontrado, demonstrando que o modelo, embora nas doses de 310 kg ha^{-1} tenham sido baixos os coeficientes de ajuste, não consegue estimar a variabilidade desse parâmetro.

Em relação à distribuição espacial do número de entrenós da soja, na dose de 310 kg ha^{-1} no talhão com o dosador de rosca helicoidal por transbordo, as plantas foram distribuídas em quatro classes, nas quais a classe de 14 a 15 nós representam a maior área, 39,39%, 15 a 16 entrenós representam 33,33%, 12 a 13 nós representam 22,72% e o restante da área de 13 a 14 entrenós (Figura 3A). No talhão do dosador de rosca helicoidal por gravidade também se distribuiu em quatro classes, porém não teve área com a menor faixa (Figura 3B), 48,98% da área teve maior concentração na faixa de 14 a 15 entrenós, seguido da faixa de 15 a 16 entrenós em 32,65% da área.

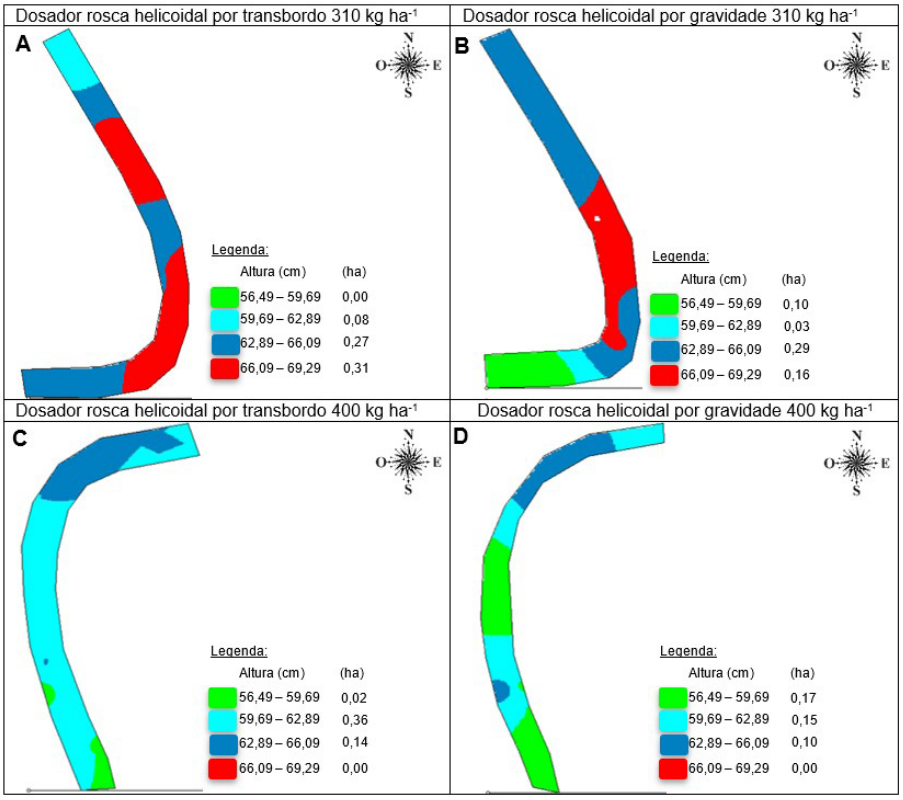


Figura 2. Distribuição espacial da altura de plantas de soja em função da distribuição de fertilizante do dosador de rosca helicoidal por transbordo nas doses de 310 kg ha^{-1} (A) e 400 kg ha^{-1} (C) e do dosador de rosca helicoidal por gravidade nas doses de 310 kg ha^{-1} (B) e 400 kg ha^{-1} (D).

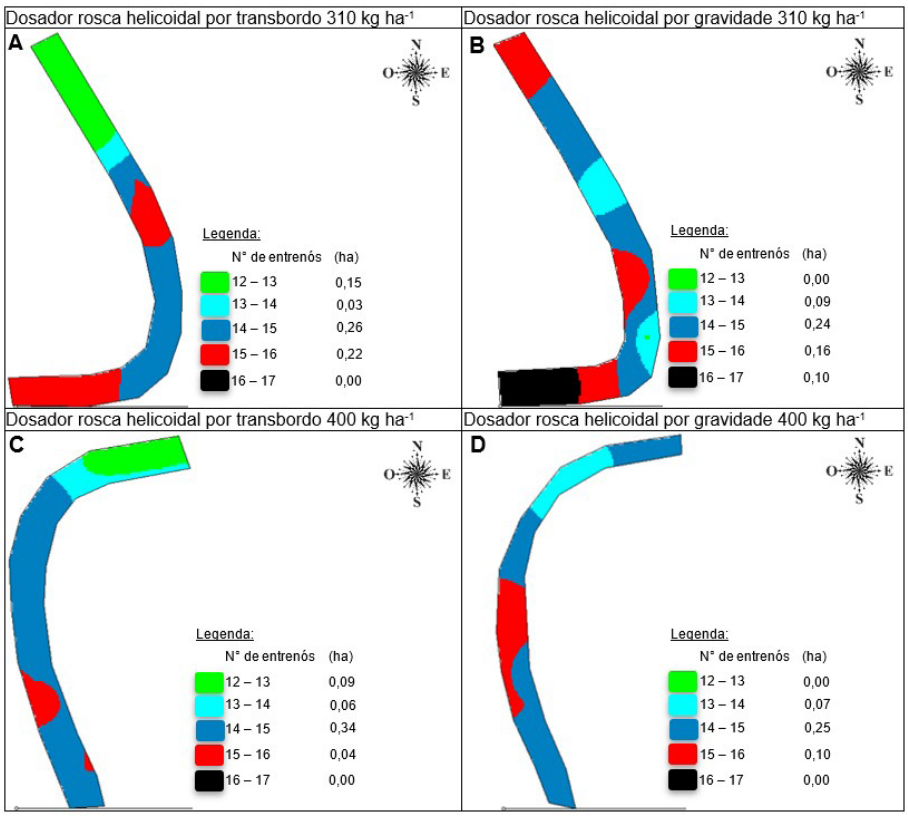


Figura 3. Distribuição espacial do número de entrenós da soja em função da distribuição de fertilizante do dosador de rosca helicoidal por transbordo nas doses de 310 kg ha^{-1} (A) e 400 kg ha^{-1} (C) e do dosador de rosca helicoidal por gravidade nas doses de 310 kg ha^{-1} (B) e 400 kg ha^{-1} (D).

Na dose de 400 kg ha^{-1}, o dosador de rosca helicoidal por transbordo apresentou comportamento similar à dose de 310 kg ha^{-1}, variando em quatro classes (Figura 3C), enquanto o dosador de rosca helicoidal por gravidade apresentou variação em apenas três classes (Figura 3D). O dosador de rosca helicoidal por transbordo apresentou maior homogeneidade em relação ao por gravidade. Tais variações demonstram, ou melhor, acionam um alerta para a técnica de condução da fertilidade do solo, pois nada adianta realizar análises da fertilidade do solo, montar mapas de aplicação, se a máquina estará variando a distribuição longitudinal do insumo, refletindo nessa variação apresentada.

Em relação à massa seca foliar (Figura 4), o dosador de rosca helicoidal por transbordo na dose de 310 kg ha^{-1} variou apenas em três classes, entre 4,62 e 6,62 Mg ha^{-1} em 50% da área, e entre 6,62 e 8,62 Mg ha^{-1} em 34,35% da área (Figura 4A). Já no dosador por gravidade (Figura 4B), há maior variabilidade, apresentando variação em quatro classes, sendo a faixa de 4,66 Mg a 6,66 Mg em 35,59% da área, que representa a segunda menor massa.

Nesse parâmetro, houve baixo CV (Tabela 1), inferior a 7%, porém, os coeficientes de assimetria e curtose não são próximos a zero no dosador por transbordo, já no gravitacional, sim; no entanto, em ambos houve baixo coeficiente de ajuste, apontando para elevada variabildiade.

Na maior dose de fertilizante (400 kg ha^{-1}), a massa seca foliar no dosador por transbordo apresentou somente duas classes, 4,66 a 6,66 Mg ha^{-1} (em 0,43 ha) e 6,66 a 8,66 Mg ha^{-1} (em 0,09 ha) (Figura 4C), e no dosador por gravidade há três classes, apontando novamente para maior homogeneidade no dosador por transbordo. Comparando as duas doses, evidencia-se a influência positiva do aumento da dose, principalmente para o dosador por transbordo, onde quase em sua área total apresentou somente uma faixa, em comparação ao dosador por gravidade, fato que pode ser explicado pela diminuição da influência da gravidade quando a dose é aumentada.

No rendimento de grãos (Figura 5), considerando 13% de umidade na colheita destes, ocorreu um fato que não contribui com os dados anteriores, pois o dosador com rosca helicoidal por gravidade teve 0,14 ha com produtividade de 70,49 a 49,49 sc ha^{-1} (Figura 5A), contra 0,07 ha do dosador por transbordo (Figura 5B), as demais faixas são próximas entre eles. Ao ampliar a dose o rosca por transbordo, teve uma área maior com

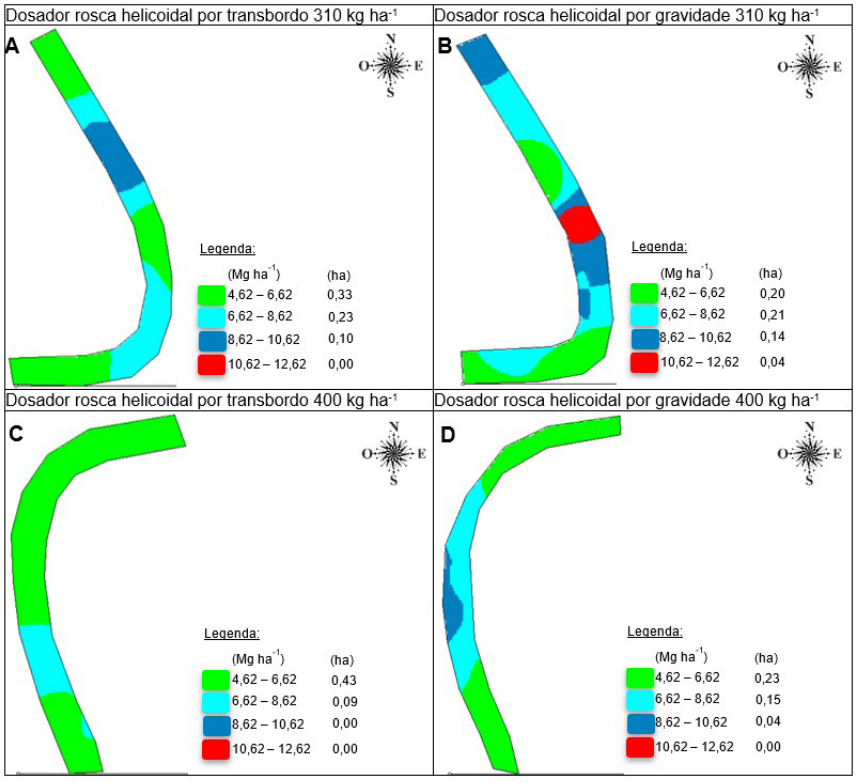


Figura 4. Distribuição espacial da massa seca foliar da soja em função da distribuição de fertilizante do dosador de rosca helicoidal por transbordo nas doses de 310 kg ha^{-1} (A) e 400 kg ha^{-1} (C) e do dosador de rosca helicoidal por gravidade nas doses de 310 kg ha^{-1} (B) e 400 kg ha^{-1} (D).

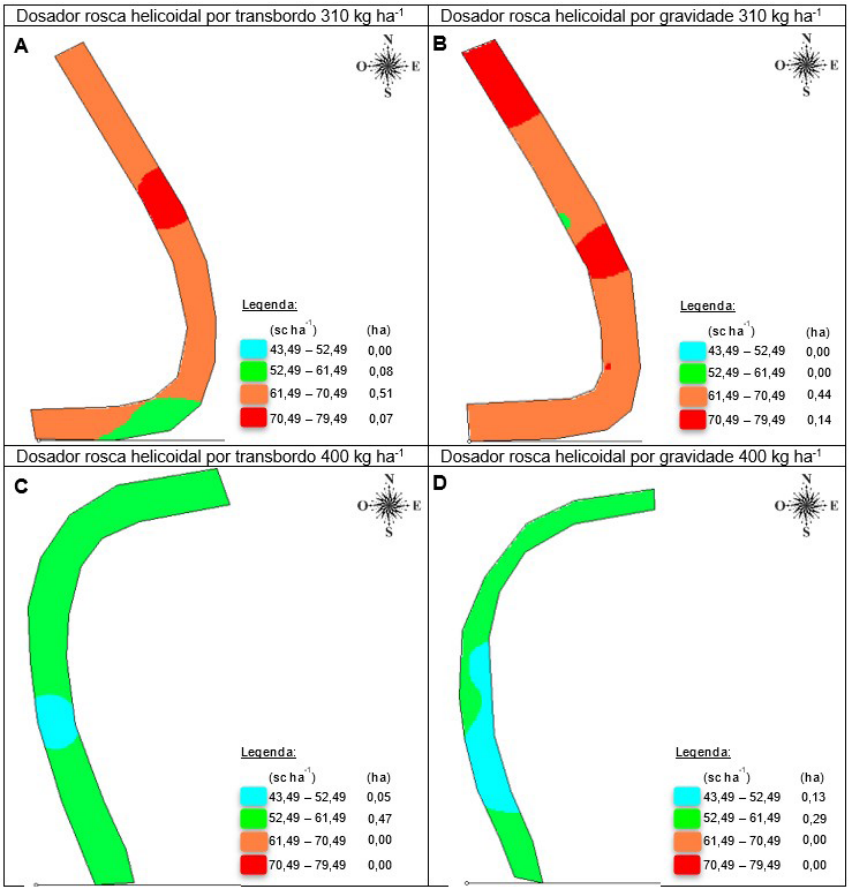


Figura 5. Distribuição espacial do rendimento de grãos da soja em função da distribuição de fertilizante do dosador de rosca helicoidal por transbordo nas doses de 310 kg ha^{-1} (A) e 400 kg ha^{-1} (C) e do dosador de rosca helicoidal por gravidade nas doses de 310 kg ha^{-1} (B) e 400 kg ha^{-1} (D).

maior produtividade, 0,47 ha ficaram na segunda escala, 52,49 a 61,49 sc ha^{-1} (Figura 5C), contra 0,29 ha do rosca por gravidade (Figura 5D), sendo que o coeficiente de ajuste do modelo geoestatítico foi muito baixo, 0,05, sendo linear, o que demonstra elevada variblidade desse parâmetro.

Essa constação demonstra que, embora o solo tenha recebido doses de fertilizante variadas, o que não era planejado, não repercutiu na planta, pois ele tem uma alta fertilidade natural, e como foi um ano climaticamente favorável ao desenvolvimento de plantas, a diferença de adubação na linha não alterou esse parâmetro.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A dosagem de fertilizante na linha varia ao longo da área, fato que na agricultura de precisão deve ser levado em consideração, haja vista que a variação da dosagem deve estar vinculada apenas à planejada. Dentre os dosadores de rosca helicoidal, o que se baseia por transbordo apresentou menor coeficiente de variação de distribuição de fertilizante e maior homogeneidade na altura das plantas, no número de nós das plantas, na massa seca da parte aérea e das raízes das plantas de soja em comparação ao dosador de rosca helicoidal por gravidade nas duas doses de fertilizantes testadas (310 kg ha^{-1} e 400 kg ha^{-1}), porém, tais variações espaciais não refletiram no rendimento de grãos na dose de 310 kg ha^{-1}.

AGRADECIMENTOS

À Agromac, pela cedência da infraestrutura de máquinas e área.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos (SAE), 2021. **Produção nacional de fertilizantes**. Disponível em: https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf/view. Acesso em: 24 abr. 2022.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 780 p.

FERREIRA, M. F. P.; OLIVEIRA, A.; MACHADO, R.L.T.; REIS, A.V.; MACHADO, A.L.T. Desempenho de distribuidores de adubo tipo rosca sem fim por transbordo e por gravidade em função do nivelamento longitudinal do dosador. **Tecnologica**, v. 11, p. 37-40, 2007.

OGUNKUNLE, A. O. Variation of some soil properties along two toposequences on quartzite schist and banded gneiss in Southwestern Nigeria. **GeoJournal**, v. 30, n. 4, p. 397-402, 1993. DOI: http://doi.org/10.1007/BF00807220.

PAGNUSSAT, L.; ROSA, D. P.; SANTOS, C. S.; TONIASO, A. M.; PESINI, F. Eficiência de dosadores helicoidais em função da dosagem na cultura da soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, XLIII., 2014, Campo Grande. **Anais [...]**. 2014.

PAGNUSSAT, L.; ROSA, D. P.; ALFLEM, J. A.; TRUSS, C. H.; FINCATTO, D. Pulso e eficiência de dosadores de rosca sem fim em função da dosagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, XLII., 2013, Fortaleza. **Anais [...]**. 2013.

PORTELLA, J. A.; SATTLER, A.; FAGANELLO, A. Regularidade da distribuição de sementes e de fertilizantes em semeadoras para plantio direto de trigo e soja. **Engenharia Agrícola**, v. 17, n. 4, p. 57-64, 1998.

REYNALDO, É. F.; GAMERO, C. A. Avaliação de mecanismos dosadores de fertilizantes helicoidais em ângulos de nivelamento longitudinal e transversal. **Energia na Agricultura**, v. 30, n. 2, p. 125-136, 2015. DOI: http://doi.org/10.17224/EnergAgric.2015v30n2p125-136.

ROSA, D. P.; PAGNUSSAT, L.; PESINI, F.; AFLEN, J. A. Dose certa. **Cultivar Máquinas**, v. 11, n. 128, p. 46-48, 2013.

ROSA, D. P.; PAGNUSSAT L.; ALVES, A.; PESINI, F.; SPAGNOLO, R. T.Methodology to evaluate the fertilizer distribution by helical doser from seed planter. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 31, p. 1-7, 2019. DOI: http://doi.org/10.9734/jeai/2019/v31i530087.

ROSA, D. P.; SPAGNOLO, R. T.; ALVES, A.; CANCIAN, C. A.; LONGARETTI, M. Redutor de perdas. **Cultivar Máquinas**, n. 170, p. 12-14, 2017.

SPAGNOLO, R. T.; PINHO, M. S.; OLDONI, A.; ROSA, D. P. Mais é melhor. **Cultivar Máquinas**, v. 181, p. 13-14, 2018.

SPAGNOLO, R. T.; ROSA, D. P.; PINHO, M. S.; SCHIAVON, C. S.; SCHMECHEL, D. K. Performance of helical metering mechanisms in the application of microgranular fertilizer. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 4, p. 481-488, 2020. DOI: http://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n4p481-488/2020.

WEIRICH NETO, P.H.; FORNARI, A. J.; JUSTINO, A.; GARCIA, L. C. Qualidade na semeadura do milho. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 1, p. 171-179, 2015. DOI: http://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n1p171-179/2015.

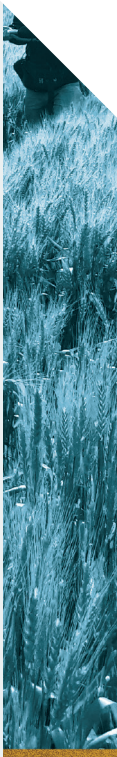
46

Experimentação on-farm com densidade de semeadura e nitrogênio na cultura do trigo: estudo de caso na Fazenda Butiá, Coxilha (RS)

On-farm experimentation with sowing density and nitrogen in wheat: case study at Fazenda Butiá, Coxilha-RS

João Leonardo Fernandes Pires[1], Carlos Goergen[2], Carlos Eduardo Buratto[3], Djone Fucks[4], Aldemir Pasinato[5], Jordano Bortoncello[6]

[1] *Pesquisador, Embrapa Trigo, Passo Fundo (RS), Brasil, joao.pires@embrapa.br*
[2] *Engenheiro-Agrônomo, Técnico, Fazenda Butiá, Coxilha (RS), Brasil, carloshgoergen@gmail.com*
[3] *Técnico Agrícola, Acadêmico, Curso de Agronomia, Centro Universitário IDEAU, Técnico, Fazenda Butiá, Coxilha (RS), Brasil, c.buratto@sementesbutia.com.br*
[4] *Engenheiro-Agrônomo, Técnico, Grupo Analys Agricultura de Precisão, Palmeira das Missões (RS), Brasil, djone@grupoanalys.com.br*
[5] *Cientista da Computação, Mestre em Fitotecnia, Analista, Embrapa Trigo, Passo Fundo (RS), Brasil, aldemir.pasinato@embrapa.br*
[6] *Técnico em Agropecuária, Acadêmico, Curso de Agronomia, Instituto Federal do Rio Grande do Sul, Sertão (RS), Brasil, jobortoncello@gmail.com (bolsista PIBIC/CNPq)*



RESUMO

O objetivo do trabalho foi realizar experimentação on-farm envolvendo densidade de semeadura e estratégias de aplicação de nitrogênio (N) em trigo, para identificar o manejo mais adequado para talhões específicos. O trabalho foi desenvolvido na Fazenda Butiá, no município de Coxilha, Rio Grande do Sul, nas safras 2020 e 2021, em talhões de 104,8 ha e 56,1 ha, respectivamente. Os ensaios foram realizados em faixas lado a lado em cada talhão, buscando percorrer diferentes Zonas de Manejo (ZMs) pré-estabelecidas. Foram utilizados tratamentos com variação na densidade de semeadura (250, 313 e 403 sementes aptas por metro quadrado (sem.m^{-2}) e estratégias de aplicação de nitrogênio em cobertura: forma tradicionalmente utilizada pelo agricultor, indicação da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, e baseada em algoritmo que utiliza o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Foi avaliado o rendimento de grãos. Os resultados indicaram que não ocorreram diferenças entre tratamentos de densidade de semeadura e para as variações utilizadas nas estratégias de aplicação de N. Com isso, foi possível indicar os tratamentos de menor custo, ou seja, a utilização de 250 sementes aptas.m^{-2} e a recomendação da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale para aplicação de N.

Palavras-chave: agricultura de precisão; rede; Embrapa; densidade de semeadura; adubação nitrogenada.

ABSTRACT

The objective of this work was to carry out on-farm experiments involving sowing density and nitrogen (N) application strategies in wheat to identify the most appropriate management for specific areas. The work was carried out at Fazenda Butiá, in the municipality of Coxilha, RS, in the 2020 and 2021 harvests, in plots of 104.8 ha and 56.1 ha, respectively. The field trials were carried out in strips side by side in each area, seeking to cover different pre-established Management Zones. Treatments with variation in sowing density (250, 313, and 403 suitable seeds m^{-2}) and nitrogen application strategies in topdressing (traditionally used by the farmer, recommended by the Brazilian Wheat and Triticale Research Commission and based on an algorithm that uses the NDVI) were used. Grain yield was evaluated. The results indicated that there were no differences between treatments for seeding density and for the variations used in N application strategies. With this, it was possible to indicate the treatments with the lowest cost, that is, the use of 250 suitable seeds m^{-2} and the indication of the Brazilian Wheat and Triticale Research Commission for the application of N.

Keywords: precision agriculture; network; Embrapa; sowing density; nitrogen fertilization.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000014

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, muitos agricultores utilizam quantidade elevada de sementes, desconsiderando a capacidade que o trigo tem para compensar – até certo ponto – a redução do número de plantas pela plasticidade fenotípica da cultura, materializada por variações viáveis dentro das estratégias de crescimento, dinâmica reprodutiva e definição dos componentes do rendimento de grãos. Essa capacidade é mais evidente em áreas de elevado potencial, que recebem manejo adequado. Entende-se que, nessa situação de ambiente e manejo, um menor número de plantas, em relação ao sistema de aplicação uniforme muito utilizado por produtores, poderia manter e até aumentar o rendimento de grãos, possibilitando economia de sementes e/ou reposicionamento das mesmas, em áreas que necessitem aumentar a densidade – aquelas com menor potencial produtivo, por exemplo –, acarretando aumento do rendimento de grãos e/ou da rentabilidade obtida na área como um todo (Corassa et al., 2018).

A utilização de variações na densidade de semeadura e na aplicação de N em trigo está baseada em resultados de pesquisa que indicam alguns coeficientes técnicos que podem ser utilizados e em resultados obtidos considerando aspectos da Agricultura de Precisão (AP), como a variabilidade entre áreas e zonas de manejo (ZMs). Por exemplo, Pires et al. (2021a, 2021b) identificaram falta de resposta da cultura do trigo, mesmo com a variação considerável da densidade de semeadura, até determinado limite, indicando a densidade adequada específica para algumas cultivares.

Outra prática importante, tanto para definição do potencial de rendimento de grãos quanto no que se refere ao custo de produção, é a adubação nitrogenada. Existe uma gama muito grande de estudos disponíveis (Wiethölter, 2011; Fontoura et al., 2013; De Bona et al., 2016) e indicações técnicas (Reunião..., 2020) quanto à dose, ao momento de aplicação e às condições da planta e do ambiente (clima e solo) mais apropriados para obtenção de eficiência máxima do uso desse nutriente. Por exemplo, deve ser realizado observando-se uma série de critérios técnicos, como dose, cultura anterior, expectativa de rendimento de grãos, momento ideal para aplicação, teor de matéria orgânica no solo, entre outros. Entretanto, existe espaço para aperfeiçoamento dessa prática, principalmente quando se considera a disponibilidade de novas ferramentas de AP e a necessidade de utilização de indicadores da dinâmica do N durante o ciclo da cultura, permitindo ajustes em tempo real da dose a ser aplicada.

Uma estratégia relevante é a utilização do sensoriamento remoto proximal ou por satélites no auxílio à definição da dose a ser aplicada. Essa abordagem vem sendo utilizada no Brasil em lavouras comerciais, mas com potencial para aprimoramento, especialmente pelo desenvolvimento de algoritmos mais apropriados para as condições brasileiras de cultivo e que levem em consideração as diferentes regiões e dinâmicas dos sistemas de produção. Nesse sentido, Bredemeier et al. (2016) e Vian et al. (2018, 2019) desenvolveram estratégias baseadas em algoritmos para a aplicação de N em cobertura no trigo utilizando o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), com refinamento apoiado nos últimos anos pela Embrapa Trigo e pela Sociedade Educacional Três de Maio (Setrem, Três de Maio-RS).

Tanto a densidade de semeadura como a melhor estratégia de aplicação de N em cobertura podem ser avaliadas e indicadas com especificidade de talhão por meio de ensaios on-farm.

Apresenta-se, a seguir, um trabalho de experimentação on-farm envolvendo densidade de semeadura e estratégias de aplicação de nitrogênio em trigo na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, que buscou identificar o manejo mais adequado para talhões específicos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado na Fazenda Butiá (28°04'33,9" S; 52°26'03,35" W), no município de Coxilha, localizado no norte do estado do Rio Grande do Sul. A fazenda emprega sistema de produção que representa o sistema utilizado por produtores com nível de tecnificação elevado, com equipamentos e práticas de manejo modernos, e solo capaz de dar suporte a potenciais produtivos elevados. Utiliza a filosofia de AP desde o ano de 2015 nas estratégias para caracterização de áreas, mapas de colheita, ZMs, mapas de prescrição, semeadura e aplicação de insumos a taxa variável, piloto automático, entre outras ferramentas/abordagens de AP. Nessa área de atuação, é apoiada, tecnicamente, por empresas/plataformas, como Grupo Analys Agricultura de Precisão, John Deere e Fieldview.

As áreas nas quais foram realizados os ensaios são cultivadas em Sistema Plantio Direto há cerca de 30 anos, com uma sequência de culturas que envolve trigo–soja–aveia-preta–milho–capim-sudão. As áreas utilizadas apresentam caracterização, do ponto de vista de solos, com amostragem em grid (3 ha) e com definição de ZMs para cada área de acordo com metodologia utilizada pelo Grupo Analys Agricultura de Precisão. Desta forma, a implementação do ensaio contou com algum conhecimento prévio sobre o histórico das áreas.

Os tratamentos escolhidos foram baseados em dados preliminares obtidos na região sobre o desempenho de trigo em função da variação na densidade de semeadura (Pires et al., 2021a, 2021b) e na aplicação de nitrogênio em cobertura no trigo (Vian et al., 2018, 2019).

Os ensaios on-farm foram realizados nas safras 2020 e 2021. As áreas escolhidas foram diferentes, sendo o cultivo de trigo realizado em dois experimentos, sendo um talhão de 104,8 ha (B16 Cinamomo, em 2020) e outro de 56,1 ha (B5 Carazinho, em 2021).

A estratégia utilizada nos ensaios on-farm para avaliação de densidade de semeadura foi a utilização de variação de densidade de semeadura, com um tratamento que representa a quantidade utilizada pelo agricultor (tratamento "Normal"), com 313 sementes aptas.m^{-2} (167 kg de sementes.ha^{-1}) e outros dois, avaliando tanto o aumento [Alta: 403 sementes aptas.m^{-2} (210 kg de sementes.ha^{-1})] quanto a redução [Baixa: 250 sementes aptas.m^{-2} (120 kg de sementes. ha^{-1})] em relação ao tratamento "Normal" (Tabela 1). Os tratamentos foram dispostos em faixas lado a lado (Figura 1), buscando percorrer diferentes Zonas de Manejo, sem repetição das faixas. A largura da faixa foi de 11 m. A cultivar de trigo utilizada foi TBIO Trunfo no espaçamento de 0,18 m.

A semeadura foi realizada em 23/06/2020 e a colheita, em 07/11/2020. As adubações de semeadura e de cobertura foram realizadas com base na análise do solo.

Na pré-colheita (07/11/2020), foram realizadas amostragens manuais de plantas em cada tratamento de densidade de semeadura para avaliação dos componentes do rendimento de grãos e das características relacionadas à colheita: espigas.m^{-2}; espiguetas.espiga^{-1}; tamanho da espiga; grãos.m^{-2}; peso de mil grãos; estatura de plantas e acamamento, dados não mostrados. O rendimento de grãos foi obtido por meio de colhedora dotada de sensores de colheita para geração dos mapas de variabilidade de rendimento de grãos do talhão. Realizaram-se "amostragens" nos mapas de colheita em quatro pontos (repetições) em cada tratamento de densidade, sendo cada valor do ponto composto pela média de três valores.

No ensaio on-farm de aplicação de N, foi utilizada variação na estratégia de aplicação de N, utilizando-se tratamentos que representaram: a forma tradicionalmente utilizada pelo agricultor; o tratamento indicado pela Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale (Biotrigo Genética, 2020), e o tratamento baseado em algoritmo desenvolvido para refinamento na indicação, com base no NDVI do trigo na

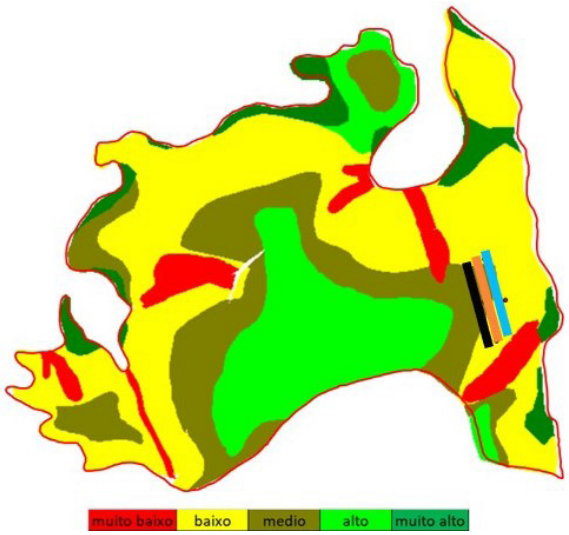


Figura 1. Experimento on-farm sobre densidade de semeadura de trigo realizado na Fazenda Butiá, Coxilha (RS), na safra 2020 (talhão B16, 104,8 ha). Zonas de manejo previamente estabelecidas no talhão em estudo, com tratamentos de densidade de semeadura implementados na área, representados pelos retângulos de cores diferentes.

Tabela 1. Tratamentos de aplicação de nitrogênio (N) em cobertura na cultura do trigo, realizados em experimentos on-farm, no sistema trigo/soja, na safra 2021. Fazenda Butiá, Coxilha (RS).

Tratamento	Adubação N base	Adubação N cobertura sexta folha do trigo	Dose total
			N/ureia
1 - Padrão agricultor	36 kg de N.ha^{-1} (200 kg.ha^{-1} da fórmula 18-48-00 N-P_2O_5-K_2O) + 54 kg de N.ha^{-1} (120 kg de ureia.ha^{-1}), juntamente com o adubo de base	54 kg de N. ha^{-1}	144 kg de N.ha^{-1}
			(320 kg de ureia. ha^{-1})
2 - Padrão Comissão Pesquisa Trigo e Triticale*	36 kg de N.ha^{-1} (200 kg.ha^{-1} da fórmula 18-48-00 N-P_2O_5-K_2O)	64 kg de N. ha^{-1}	100 kg de N.ha^{-1}
			(222 kg de ureia. ha^{-1})
3 - Ajustado por algoritmo baseado no NDVI na sexta folha	36 kg de N.ha^{-1} (200 kg.ha^{-1} da fórmula 18-48-00 N-P_2O_5-K_2O)	80 kg de N.ha^{-1}	116 kg de N.ha^{-1}
			(258 kg de ureia.ha^{-1})

* Biotrigo Genética Ltda (2020); NDVI: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.

sexta folha, avaliado com o uso do sensor óptico ativo GreenSeeker® (Tabela 1). Os tratamentos foram dispostos em faixas lado a lado, buscando percorrer diferentes Zonas de Manejo pré-estabelecidas, sem repetição. O estudo foi realizado com a cultivar de trigo TBIO Calibre semeada em 10/7/2021 na densidade de semeadura de 280 sementes aptas.m^{-2} e espaçamento de 0,17 m (Figura 2). A colheita ocorreu em 21/11/2021.

A adubação de base foi de 200 kg.ha^{-1} da fórmula 18-48-00 (N-P_2O_5-K_2O). Parte da aplicação de N foi realizada na semeadura e o restante, na sexta folha do trigo, com o uso do trator John Deere e do distribuidor KUHN Accura 1600. A faixa de aplicação do N foi de 27 m, representando a largura da faixa de cada tratamento, sendo a ureia SuperNpro utilizada como fonte de N.

Avaliações de rendimento de grãos foram realizadas manualmente em 8/11/2021 por meio da localização dos pontos com GPS manual e da coleta de amostras de grãos em cinco linhas de 4 m de comprimento em cada ponto, perfazendo 3,4 m^2 por parcela.amostra^{-1}. Foi calculado o rendimento de grãos (kg.ha^{-1}) na umidade padrão de 13%.

Foram obtidos mapas de colheita que representaram a variabilidade da área e dos possíveis efeitos dos tratamentos aplicados. Nos mapas de colheita, foram "amostrados" quatro pontos (repetições) para cada tratamento, com valores de rendimento de grãos obtidos na média de quatro valores do sensor de colheita mais próximos ao ponto de amostragem manual. Todas as avaliações foram obtidas na zona de médio potencial produtivo.

Para a visualização dos locais dos experimentos, utilizou-se a ferramenta "Google Satélite", disponível no software QGIS (QGIS, 2022). Informações de rendimento foram obtidas extraindo-se os dados dos mapas de colheita. Para isso, utilizou-se o software de Sistema de Informações Geográficas (SIG) ArcGis 10.0 (ESRI, 2011). Foram excluídos pontos *outliers* dos mapas de colheita – abaixo de 1 t.ha^{-1} e acima de 8 t. ha^{-1}. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva e os mapas resultantes foram interpolados por *krigagem*.

Os dados de rendimento de grãos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F (5% de significância), por meio do aplicativo Sisvar (Ferreira, 2019).

Foi realizada análise econômica básica dos resultados obtidos. Compararam-se os custos de cada tratamento, com base no valor de sementes e da fonte nitrogenada utilizadas, considerando-se os demais custos variáveis de forma igual para todos os tratamentos em cada ensaio on-farm. Foram empregados valores praticados pelo mercado na época de implantação dos ensaios.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No ensaio de densidade de semeadura de trigo, o mapa de rendimento de grãos mostrado na Figura 3 indica rendimentos de grãos extremos inferiores a 2.170 kg.ha^{-1} e superiores a 4.450 kg.ha^{-1}. Os rendimentos de grãos médios a baixos concentraram-se nas bordas da lavoura.

Não houve variação no rendimento de grãos em função da variação na densidade de semeadura utilizada entre 250 e 403 sementes aptas.m^{-2} (Tabela 2).

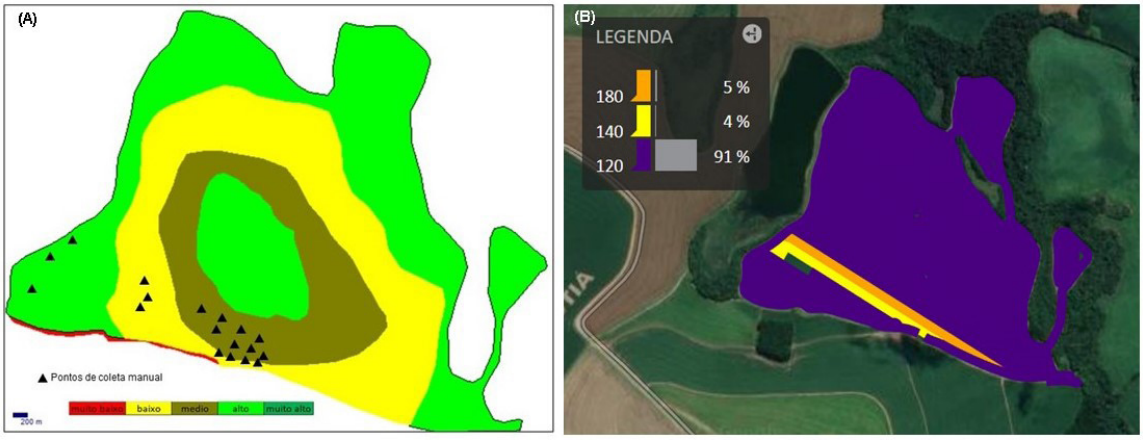


Figura 2. Experimento on-farm sobre aplicação de nitrogênio em cobertura no trigo realizado na Fazenda Butiá, Coxilha (RS), na safra 2021 (talhão B5, 56,1 ha). A) zonas de manejo previamente estabelecidas no talhão em estudo, com pontos indicando locais de coleta manual de amostras; e B) tratamentos de doses de nitrogênio em cobertura, aplicados em faixas em parte do talhão.

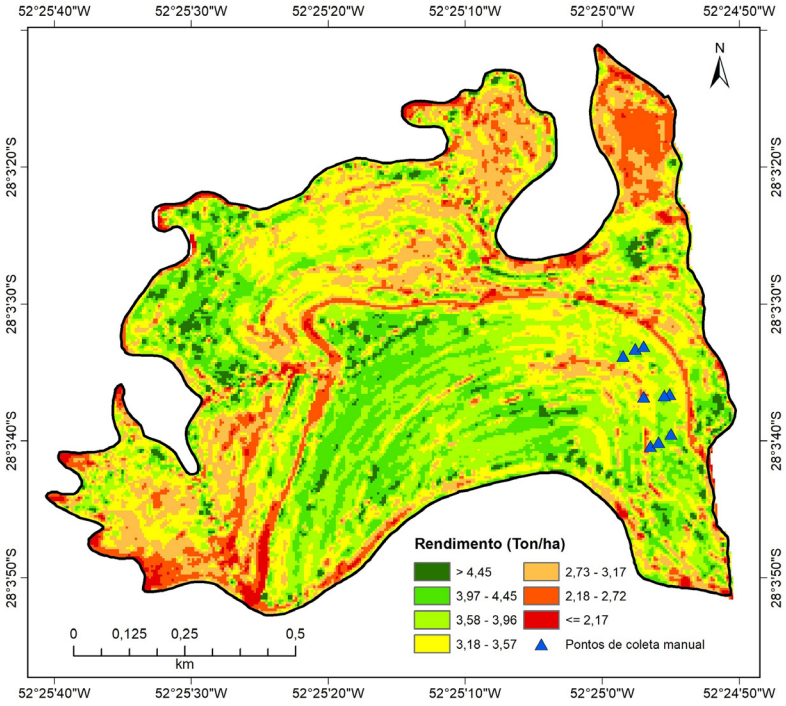


Figura 3 - Variabilidade no rendimento de grãos de trigo no talhão em estudo, com indicação dos pontos de coleta manual de amostras para avaliação dos componentes do rendimento de grãos no ensaio on-farm sobre densidade de semeadura de trigo realizado na Fazenda Butiá, Coxilha-RS, na safra 2020.

Tabela 2. Rendimento de grãos de trigo em diferentes densidades de semeadura, em ensaio on-farm, na Fazenda Butiá, Coxilha (RS), na safra 2020.

Densidade de semeadura (sementes aptas.m^{-2})	Rendimento de grãos (t.ha^{-1})
250 (Baixa)	4,0 ns
313 (Normal)	3,5
403 (Alta)	3,6

ns: não significativo pelo teste F; C. V.% = 5,5.

Realizou-se uma simulação do potencial de redução de custos com a utilização da densidade máxima e dos demais níveis de densidade, aplicando custo de sementes na safra 2021 de R$ 3,49.kg^{-1} (Coopatrigo, 2022[1]). A redução da densidade de Alta para Baixa permitiria economizar 90 kg.ha^{-1} de sementes, o que representa economia de R$ 314,10.ha^{-1} ou de R$ 32.918,00 no talhão como um todo. Já a redução de Normal para Baixa permitiria economizar 47 kg.ha^{-1} de sementes, o que representa uma economia de R$ 164,03.ha^{-1} ou R$ 17.201,00 em todo o talhão.

Cabe destacar que a área utilizada apresenta condições adequadas para cultivo de trigo, uso de tecnologia, padrão de manejo da lavoura elevado e histórico de potencial de rendimento de grãos acima da média. Portanto, possíveis ajustes de densidade de semeadura em outras condições – talhões da mesma fazenda ou em outras propriedades – devem levar em consideração as características da área, da cultivar, do clima da região, entre outras.

Na avaliação de estratégias para adubação nitrogenada em trigo, o mapa de rendimento de grãos na safra 2021 (Figura 4) demonstrou o elevado potencial de rendimento de grãos da área, com valores variando de inferiores a 3.000 kg.ha^{-1} até superiores a 6.000 kg.ha^{-1}. No talhão, considerando a variação encontrada, poucas foram as áreas que apresentaram rendimento médio ou baixo de grãos, concentrando-se estas áreas nas bordas e em alguns pequenos pontos ao longo do talhão.

Na Tabela 3, são apresentados os dados de rendimento de grãos das diferentes estratégias de aplicação de N. Apesar de alguma limitação para aplicação da estatística convencional neste estudo, aplicou-se a análise de variância e não foram verificadas diferenças entre tratamentos.

Aplicando-se os dados na área do estudo, seria possível reduzir em 44 kg de N.ha^{-1} (equivalente a 98 kg de ureia.ha^{-1}) passando do manejo padrão do agricultor para o recomendado, ou reduzir 16 kg de N.ha^{-1} (equivalente a 36 kg de ureia.ha^{-1}) passando do manejo indi-

[1] Informação pessoal do Engenheiro Agrônomo da Coopatrigo Fábio Hauschild, em 25 de março de 2022.

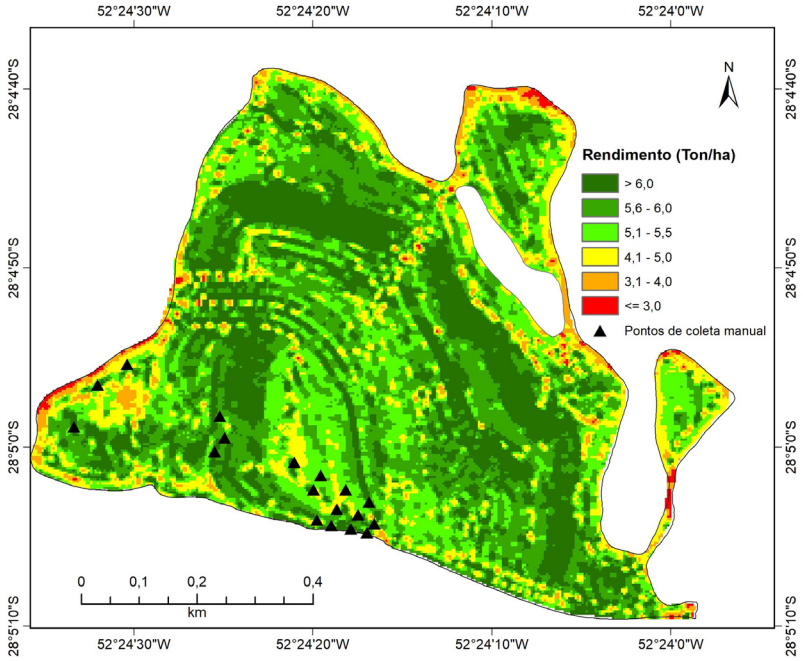


Figura 4 - Variabilidade no rendimento de grãos de trigo no talhão em estudo com indicação dos pontos utilizados para coleta manual de amostras no ensaio on-farm sobre aplicação de nitrogênio em cobertura no trigo, realizado na Fazenda Butiá, Coxilha-RS, safra 2021.

Tabela 3. Rendimento de grãos de trigo obtidos por meio de coleta manual de amostras e amostragem no mapa de colheita, em ensaio on-farm, com diferentes estratégias de aplicação de N na Fazenda Butiá, Coxilha (RS), na safra 2021.

Estratégia de aplicação de nitrogênio	Rendimento de grãos (t.ha^{-1})	
	Coleta manual	Mapa de colheita
1 - Padrão agricultor	6,6 ns	6,0 ns
2 - Padrão Comissão Pesquisa Trigo e Triticale*	6,4	5,5
3 - Ajustada por algoritmo baseado no NDVI na sexta folha	6,3	5,2
C. V. (%)	12,3	7,9

* Biotrigo Genética Ltda (2020); ns: não significativo pelo teste F; C. V.: coeficiente de variação; NDVI: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.

cado pelo algoritmo (NDVI) para o recomendado. Esses valores de redução no uso do N, quando aplicados aos valores da ureia praticados na safra – R$ 1.824,00.t^{-1}, segundo Index Mundi (2022) – permitiriam a redução de R$ 178,80.ha^{-1}, na primeira situação, e R$ 29,20.ha^{-1}, na segunda. Considerando a área total do talhão (56,1 ha), a economia total seria de R$ 10.032,00 ou R$ 1.638,00, se comparada ao sistema usado pelo produtor ou pelo algoritmo, respectivamente.

Assim, de forma hipotética, o agricultor poderia modificar a forma de aplicação no talhão, substituindo-a pela aplicação indicada pela Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, mantendo o potencial de rendimento de grãos com menor custo do insumo N e menor impacto ambiental.

Com relação à validação da estratégia envolvendo a avaliação do NDVI na sexta folha (algoritmo), nessa situação específica (ZM de médio potencial produtivo), esta não se mostrou mais eficiente em relação aos demais métodos, cabendo realizar outros estudos/ajustes na metodologia para refinamento da tecnologia.

4 CONCLUSÕES

A densidade de semeadura de trigo mais apropriada para o talhão em estudo é de 250 sementes aptas.m^{-2}.

A estratégia para adubação nitrogenada atualmente usada como Padrão da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale é a opção mais adequada para o talhão.

AGRADECIMENTOS

Aos proprietários e funcionários da Fazenda Butiá, pelo apoio à realização destes trabalhos.

REFERÊNCIAS

BIOTRIGO GENÉTICA LTDA. **Informações técnicas para trigo e triticale:** safra 2020. Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale. Passo Fundo:

Biotrigo Genética, 2020. Disponível em: http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/214730/1/informacoestecnicasparatrigoetriticalesafra2020-1592946148.pdf. Acesso em: 21 dez. 2021.

BREDEMEIER, C.; VIAN, A. L.; PIRES, J. L. F. Aplicação de nitrogênio em tempo real: modelos e aplicações. In: SANTI, A. L.; GIOTTO, E.; SEBEM, E.; AMAO, T. J. C. (Eds.). **Agricultura de precisão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria: CESPOL, 2016. p. 137-158.

CORASSA, G. M.; AMADO, T. J. C.; STRIEDER, M. L.; SCHWALBERT, R.; PIRES, J. L. F.; CARTER, P. R.; CIAMPITTI, I. A. Optimum soybean seeding rates by yield environment in Southern Brazil. **Agronomy Journal**, vol. *110*, no. 6, pp. 2430-2438, 2018. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj2018.04.0239.

DE BONA, F.; DE MORI, C.; WIETHÖLTER, S. Manejo nutricional da cultura do trigo. **Informações Agronômicas**, no. 154, pp. 1-16, 2016.

ESRI. **ArcGIS desktop**: release 10. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2011. Disponível em: https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/overview. Acesso em: 11 out. 2022.

FERREIRA, D.F. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, vol. *37*, no. 4, pp. 529-535, 2019. DOI: http://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450.

FONTOURA, S. M. V., VIERO, F.; BAYER, C.; MORAES, R. P. de. **Adubação nitrogenada em cereais de inverno na região Centro-Sul do Paraná**. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2013. v. 1, 42 p.

INDEX MUNDI. **Ureia**: preço mensal: preço das mercadorias, 2022. Disponível em: https://www.indexmundi.com/pt/pre%C3%A7os-de-mercado/?mercadoria=ureia&meses=12. Acesso em: 8 mar. 2022.

PIRES, J. L. F.; SCHEEREN, P. L.; CAIERAO, E.; CASTRO, R. L. de; LAU, D.; SANTANA, F. M.; CUNHA, G. R. da; CARAFFA, M.; TOIGO, M. de C.; SANTOS, H. P. dos; GUARIENTI, E. M.; MIRANDA, M. Z. de; VIEIRA, V. M.; FAE, G. S.; KLEIN, M. A.; RIFFEL, C. T.; ZENI, M.; MANFRON, A. C. A.; PASINATO, A. **Indicações para o manejo da cultivar de trigo BRS Belajoia (RS, SC e sul do PR)**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2021a. 23 p. (Comunicado técnico, 383).

PIRES, J. L. F.; SCHEEREN, P. L.; CASTRO, R. L. de; CAIERAO, E.; GUARIENTI, E. M.; LAU, D.; CUNHA, G. R. da; SANTANA, F. M.; CARAFFA, M.; TOIGO, M. de C.; SANTOS, H. P. dos; MIRANDA, M. Z. de; FAE, G. S.; VIEIRA, V. M.; KLEIN, M. A.; RIFFEEL, S. T.; PASINATO, A. **Indicações para o manejo da cultivar de trigo BRS Reponte (RS, SC e sul do PR)**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2021b. 24 p. (Comunicado técnico, 380).

QGIS. **QGIS:** a free and open source geographic information system. 2022. Disponível em: https://qgis.org/en/site/. Acesso: 25 ago. 2022.

VIAN, A. L., BREDEMEIER, C.; DRUM, M. A.; MORAIS, G. L.; FRANCHESTTE, J. A. B.; PIRES, J. L. F.; GARAFFA, M.; TRENTIN, C.; FORNARI, M. Modelo para adubação nitrogenada em cobertura em taxa variada em trigo por meio do NDVI no sul do Brasil. In: REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE, 13., 2019, Passo Fundo. **Anais** [...]. Passo Fundo: Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale, 2019. p. 155-159.

VIAN, A. L.; BREDEMEIER, C.; TURRA, M. A.; GIORDANO, C. P. S.; FOCHESATTO, E.; SILVA, J. A.; DRUM, M. A. Nitrogen management in wheat based on the normalized difference vegetation index (NDVI). **Ciência Rural**, vol. *48*, no. 9, pp. 1-9, 2018. DOI: http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170743.

WIETHÖLTER, S. Fertilidade do solo e a cultura do trigo no Brasil. In: PIRES, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA, G. R. (Eds.). **Trigo no Brasil***: bases para produção competitiva e sustentável. Passo Fundo: Embrapa Trigo*, 2011. p. 135-184.

47

Indicações metodológicas para a realização de ensaios on-farm no âmbito da Agricultura de Precisão

Methodological indications for carrying out on-farm trials within the scope of Precision Agriculture

João Leonardo Fernandes Pires[1], Ziany Neiva Brandão[2], Álvaro Vilela de Resende[3], Célia Regina Grego[4], Edison Ulisses Ramos Junior[5], Carlos Manoel Pedro Vaz[6], Julio Cezar Franchini dos Santos[7], Ronaldo Pereira de Oliveira[8], Christian Bredemeier[9], André Luis Vian[10], Carolina Trentin[11]

[1] *Pesquisador, Embrapa Trigo, Passo Fundo (RS), Brasil, joao.pires@embrapa.br*
[2] *Analista, Embrapa Algodão, Campina Grande (PB), Brasil, ziany.brandao@embrapa.br*
[3] *Pesquisador, Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas (MG), Brasil, alvaro.resende@embrapa.br*
[4] *Pesquisadora, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, celia.grego@embrapa.br*
[5] *Pesquisador, Embrapa Soja/Agrosilvipastoril, Sinop (MT), Brasil, edison.ramos@embrapa.br*
[6] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, carlos.vaz@embrapa.br*
[7] *Pesquisador, Embrapa Soja, Londrina (PR), Brasil, julio.franchini@embrapa.br*
[8] *Pesquisador, Embrapa Solos, Rio de Janeiro (RJ), Brasil, ronaldo.oliveira@embrapa.br*
[9] *Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), Brasil, cbredemeier@gmail.com*
[10] *Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (RS), Brasil, vian.agronomo@gmail.com*
[11] *Doutoranda da Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo (RS), Brasil, carolinatrentin@live.com*

RESUMO

A realização de ensaios na fazenda (on-farm) é uma oportunidade importante para a identificação de produtos e processos, bem como doses e interações, específicos para uso nas áreas comerciais, considerando a variabilidade das mesmas. No contexto da Agricultura de Precisão (AP), esses ensaios são fundamentais para o uso de insumos em taxa variável e podem ser facilitados pela disponibilidade de ferramental já utilizado na rotina de muitas fazendas. O objetivo deste trabalho foi apresentar algumas indicações metodológicas para a realização de ensaios on-farm com foco na AP, advindas da experiência acumulada na Rede AP da Embrapa. Por meio de estudos de caso realizados em fazendas em diferentes regiões do Brasil, envolvendo as culturas de algodão, cana-de-açúcar, soja, milho e trigo, foi possível exercitar a realização de experimentos on-farm, com suas potencialidades e dificuldades. Foi possível identificar e/ou validar questões metodológicas importantes para a realização adequada de ensaios on-farm, que podem se somar ao conhecimento disponível sobre o assunto.

Palavras-chave: agricultura de precisão; rede; Embrapa.

ABSTRACT

On-farm trials are an important opportunity to identify products and processes, as well as doses and interactions, specific for use in commercial areas, considering their variability. In the context of Precision Agriculture (PA), it is fundamental for the use of inputs at a variable rate and can be facilitated by the availability of tools already used in many farms. The main goal of this work is to present some methodological indications to carry out on-farm trials with a focus on PA, resulting from the experience accumulated in Embrapa's PA Network. Through case studies on farms in different regions of Brazil, involving cotton, sugarcane, soybean, corn, and wheat, it was possible to carry out on-farm trials, with their potentiality and difficulties. It was possible to identify and/or validate important methodological issues for the proper usage of on-farm trials, which can be added to the available knowledge on the subject.

Keywords: precision agriculture; network; Embrapa.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000019

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

A realização de ensaios on-farm no âmbito da Agricultura de Precisão (AP) deve basear-se em princípios e metodologias adequadas para que se possa obter o máximo retorno dessa abordagem. No Brasil, várias instituições, empresas e agricultores utilizam ensaios on-farm como parte do ciclo da AP. Portanto, existe acúmulo considerável de experiências sobre o tema, mas que estão fragmentadas em diversas regiões, sistemas de cultivo e níveis de evolução. A Rede Embrapa, por meio de experiências realizadas no tema, busca contribuir com algumas indicações técnicas sobre a realização de ensaios on-farm. Algumas delas são princípios que podem ser aplicados de forma generalizada, enquanto outras requerem contextualização e adaptação para as diferentes realidades.

Os objetivos principais da realização de ensaios on-farm podem ser sintetizados em: identificação de tecnologias – envolvendo produtos e processos – mais apropriadas para uso específico (em escala de talhão para cada propriedade) e, no conjunto de ensaios avaliados, a identificação de tecnologias com melhor desempenho para uso geral (indicação generalizada).

No contexto da AP, parece mais relevante, para os interesses dos agricultores, o objetivo de gerar informações para auxílio nas decisões de manejo específicas para cada talhão, pois estão associadas ao conceito de existência de variabilidade nos condicionantes do rendimento de grãos. Assim, na medida em que esta variabilidade é exclusiva de cada talhão, há necessidade de ser tratada com manejo específico. Embora redes de ensaios com desenhos similares possam ser úteis, sua relevância para o agricultor individual é secundária, sendo estas mais direcionadas para atender às demandas dos desenvolvedores das tecnologias e considerações comerciais. No entanto, isso não deve impedir o compartilhamento de resultados e o aprendizado colaborativo, especialmente no que diz respeito a questões, situações e desafios comuns enfrentados pelos agricultores.

Após estabelecer o objetivo da pesquisa, o próximo passo é a realização propriamente dita de cada ensaio específico. Ketterings et al. (2012) delineiam sete etapas – não exclusivas para AP – para a realização de ensaios on-farm: (1) identificação do problema de pesquisa; (2) definição do desenho e formato das parcelas; (3) seleção da área ou talhão apropriado; (4) execução do ensaio; (5) coleta de dados; (6) análise de dados, e (7) extração de aprendizados a partir dos dados obtidos e repetição do processo, se necessário.

A condução de experimentos on-farm com o objetivo de gerar informações para uma propriedade específica pode ser realizada por meio da utilização de equipamentos disponíveis ao agricultor. Indica-se que esses equipamentos estejam equipados com tecnologias, como GPS, sensores e dispositivos de distribuição à taxa variável, as quais possibilitam a automação dos processos de aplicação da tecnologia sob avaliação. Além disso, esses recursos também permitem o monitoramento da colheita, viabilizando a análise dos efeitos dos tratamentos sobre o rendimento de grãos e outras variáveis de interesse. Normalmente, as áreas de estudo são digitalmente demarcadas em parcelas grandes ou faixas, distinguindo os diferentes tratamentos das variáveis de interesse. Por exemplo, uma parcela pode conter a cultivar utilizada pelo produtor, enquanto outra parcela, a nova cultivar a ser avaliada. Além disso, os tratamentos devem conter pelo menos duas repetições na mesma área e safra. As parcelas podem ser demarcadas em áreas homogêneas previamente identificadas, como talhões com comportamento conhecido, ou cruzando regiões com potenciais produtivos distintos, como as zonas de manejo estabelecidas por meio de técnicas de agricultura de precisão. O importante é que todos os tratamentos estejam presentes em todas as regiões. Podem ser utilizados sensores, como os sensores de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) embarcados em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), para monitorar o desenvolvimento da cultura e das parcelas durante o ciclo. Faz-se essencial a colheita com o uso de um monitor de produtividade, possibilitando assim a obtenção de mapas de rendimento que englobam as parcelas previamente delimitadas. Isso permite a análise do desempenho produtivo de cada tecnologia (insumo, cultivar, etc.) avaliada. Podem ainda ser feitas avaliações de solo ou das plantas nas parcelas durante e no final do ciclo, com o intuito de obter mais informações sobre os efeitos das tecnologias.

A Figura 1 ilustra o ciclo de realização de ensaios on-farm no contexto da AP, destacando as principais etapas e decisões que podem levar para caminhos diferentes em termos metodológicos e de obtenção dos resultados.

A Figura 1 também evidencia que a realização ou não do ensaio, o nível de complexidade, a resposta à pergunta formulada e a repetição do ensaio dependem do propósito e de fatores relacionados à disponibilidade de equipamentos e de informações, assim como da qualidade requerida na condução do ensaio. Por exemplo: caso haja disponibilidade de equipamentos bem calibrados para automatizar a condução, torna-se viável realizar ensaios mais complexos com maior facilidade e precisão. No entanto, mesmo com diferentes níveis dos recursos disponíveis nas propriedades, normalmente é possível utilizar repe-

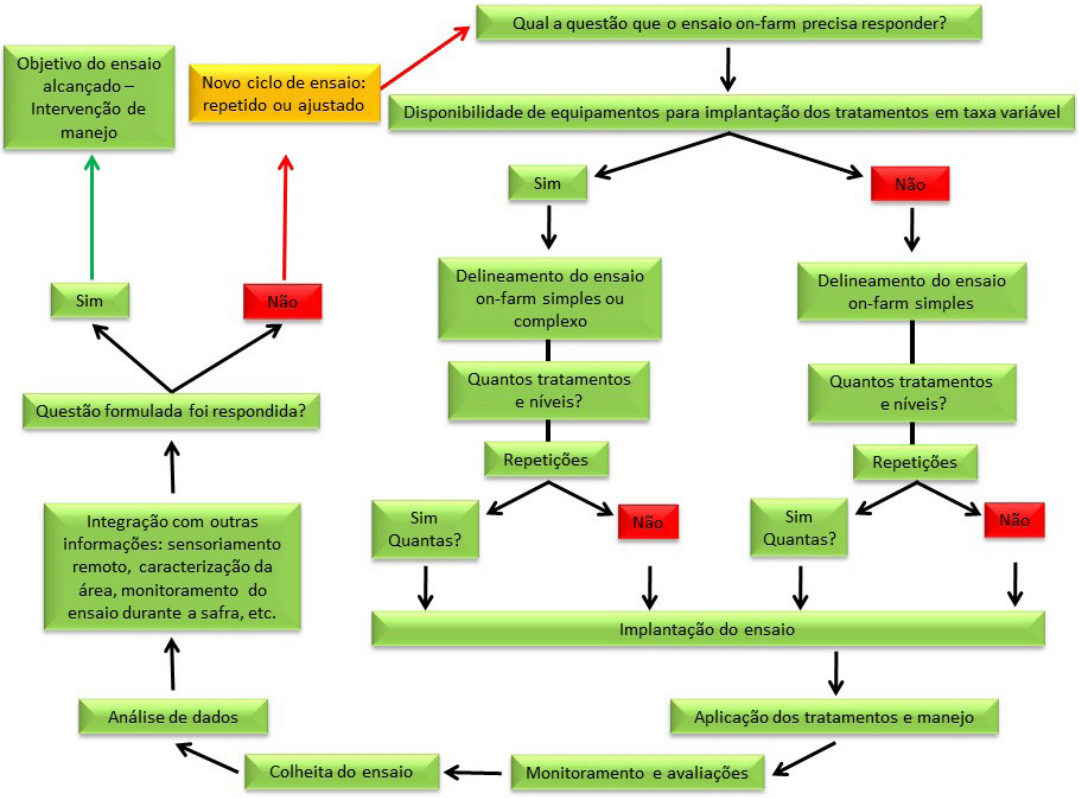


Figura 1. Ciclo de realização de ensaios on-farm no âmbito da Agricultura de Precisão.
Fonte: adaptado de Bramley et al. (2006).

tições e realizar todas as etapas necessárias, incluindo a análise de dados, para alcançar os objetivos propostos no ensaio. Caso os objetivos do ensaio não sejam alcançados, é possível repeti-lo no mesmo formato ou com ajustes metodológicos para corrigir eventuais deficiências identificadas. Quando o ensaio atinge os objetivos com nível adequado de confiabilidade, as informações obtidas são utilizadas para auxiliar na tomada de decisões relativas ao manejo a ser implementado no talhão ou em toda a fazenda.

A seguir, são apresentadas e discutidas algumas sugestões metodológicas para as principais etapas na realização de ensaios on-farm no âmbito da AP, as quais devem ser adaptadas de acordo com a experiência dos usuários e as condições ambientais e de manejo específicas de cada sistema de produção.

2 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA OU TECNOLOGIA A SER RESOLVIDA OU AVALIADA NOS ENSAIOS ON-FARM E FORMULAÇÃO DAS QUESTÃOÕES A SEREM RESPONDIDAS

O primeiro passo na realização de um ensaio on-farm é a definição do problema específico ou da decisão de manejo/tecnologia a ser avaliada. Diversos fatores influenciam essa escolha, incluindo o nível de maturidade na adoção da AP na propriedade, a disponibilidade de equipamentos e a identificação dos fatores de manejo que limitam o rendimento de grãos ou a rentabilidade em cada situação específica, entre outros. Para Nielsen (2008), ao formular uma questão a ser respondida ou uma hipótese, esta deve ser simples, como, por exemplo, a comparação de herbicida A com B, e o milho tratado com fungicida *versus* o milho não tratado. Isso se deve ao fato de que ensaios demandam tempo, energia e recursos financeiros, e quanto mais complexos forem, maior será a exigência desses recursos. No entanto, quando se trata da necessidade de identificar a dose ideal de um insumo, como quantidade de semente ou fertilizante, é importante incluir uma faixa mais ampla de tratamentos. Isso possibilita a obtenção de dados suficientes para ajustar uma curva de regressão, permitindo a estimativa da máxima resposta econômica.

Na formulação da questão a ser respondida, também é importante considerar a magnitude da diferença esperada entre os tratamentos. Embora isso possa conter um elevado grau de incerteza, é um aspecto que deve ser ponderado na avaliação da efetividade do ensaio e dos ajustes metodológicos necessários. De acordo com Kindred et al. (2018), ensaios on-farm geralmente conseguem detectar diferenças no rendimento de grãos entre 0,3 e 0,5 tonelada por hectare, sendo que apenas aqueles muito precisos

conseguem evidenciar diferenças tão sutis quanto 0,1 tonelada por hectare. Assim, ensaios com fatores dos quais são esperadas pequenas diferenças entre tratamentos exigem uma maior precisão experimental ou da expectativa de resultados com menor grau de confiabilidade. Nesses casos, a conveniência de conduzir tais ensaios deve ser cuidadosamente avaliada, especialmente em culturas graníferas, cujos produtos comerciais têm baixo valor agregado.

Outro princípio fundamental da AP, que deve ser considerado ao se decidir sobre a realização de ensaios on-farm e orientar o desenho experimental, é o nível de variabilidade presente na área específica (talhão) objeto de estudo. Algumas áreas são tão homogêneas que possibilitam a realização de ensaios on-farm capazes de representar a totalidade da área, fornecendo informações sobre as tecnologias, doses ou taxas para uso que podem ser aplicadas em toda a área (taxa fixa). Em outro extremo, a variabilidade pode ser tão grande que impede a realização de ensaios on-farm com nível adequado de precisão, requerendo ações anteriores para minimizar a variabilidade existente. Para que seja possível escolher um caminho a seguir, é fundamental a caracterização prévia da área do estudo, por meio de diferentes "camadas de informações", que vão desde mapa de classificação do solo presente na área (estudos de pedologia) até mapas de colheita (rendimento de grãos) de várias safras/culturas, que auxiliem na localização de regiões com diferenças no potencial de rendimento.

O entendimento, por parte do agricultor, sobre o objetivo e o potencial de uso dos resultados de experimentos on-farm é fundamental para o sucesso desse tipo de estratégia de pesquisa em AP. Muitas vezes, o agricultor não tem a dimensão real da oportunidade de aplicação dos dados gerados para sua lavoura (custo × benefício) e da necessidade de respeitar a metodologia proposta. É comum, no cotidiano da propriedade, ocorrerem dificuldades de implementação e condução dos ensaios on-farm, pois o agricultor prioriza os processos de manejo da lavoura, por exemplo, não respeitando os tratamentos (variações de manejo) propostos, não utilizando o monitor de colheita para quantificar os resultados das parcelas, entre outros. É fundamental que se entenda a necessidade de respeitar a metodologia proposta e pactuada no início do trabalho, com o contraste sugerido entre os tratamentos em estudo. Por outro lado, é importante que aqueles que propõem o ensaio (pesquisador, consultor, assistente técnico) compreendam que a área do agricultor não é análoga a uma estação experimental, onde se fazem estudos com grande número de parcelas e tratamentos, utilizando os princípios da experimentação tradicional e do controle ambiental rigoroso. Sempre que possível, é essencial que o produtor se veja como um dos principais beneficiários do trabalho. Portanto, as metodologias empregadas devem ser as mais simples, permitindo a coleta dos dados necessários para a interpretação dos resultados, ao mesmo tempo em que facilitam o manejo operacional.

Na Tabela 1, são sumarizadas algumas sugestões de etapas ou procedimentos a serem considerados na definição do problema e nas possíveis respostas a serem buscadas por meio da realização de ensaios on-farm.

3 PLANEJAMENTO DE ENSAIOS ON-FARM

No processo de planejamento de experimentos on-farm, é geralmente previsto que a fazenda seja responsável por implementar e conduzir o ensaio, além de fornecer acesso aos dados espaciais e de manejo cultural. Por outro lado, ao(s) coordenador(es) dos ensaios, cabe: realizar o planejamento; realizar o acompanhamento das áreas (por meio de vistorias) durante o desenvolvimento da cultura e nas avaliações críticas, e processar os dados provenientes dos ensaios e fornecê-los de volta ao produtor, além de sumarizar as informações de diversos ensaios on-farm, dependendo do objetivo.

Um planejamento adequado aumenta significativamente a probabilidade de se obterem resultados válidos, reduzindo os ruídos e os riscos inerentes aos trabalhos realizados em lavouras comerciais.

A seleção da área para a realização dos ensaios on-farm varia de acordo com os objetivos específicos do estudo. Por exemplo, para a identificação da população ideal de plantas, podem ser escolhidas áreas que já estejam bem caracterizadas, com zonas de manejo definidas, permitindo a avaliação da melhor população para cada uma dessas zonas. No caso da avaliação de adubação ou de produtos fitossanitários, é recomendável escolher áreas com deficiência nutricional conhecida ou com presença confirmada da praga, respectivamente.

Uma etapa crucial do planejamento é o desenho (delineamento) do ensaio, com diversas opções possíveis, cada uma com suas vantagens e desvantagens. A escolha deve ser fundamentada em considerações, como o nível de caracterização da área do estudo e os tratamentos a serem utilizados.

A escolha do desenho experimental (faixas, blocos, delineamentos complexos, entre outros) também depende de fatores, como a disponibilidade de tecnologia para aplicação em taxa variável, o tipo de sensores e suas resoluções para monitoramento, o tempo

Tabela 1. Resumo dos principais passos na etapa de análise do problema/pergunta a ser respondido com a realização de ensaios on-farm no âmbito da Agricultura de Precisão.

Procedimentos na análise do problema/pergunta a ser respondido com a realização de ensaios on-farm
Estabelecimento claro da(s) pergunta(s) a ser(em) respondida(s) e hipótese(s).
Busca prévia, se disponíveis, de resultados de pesquisa on-farm ou em estações experimentais (que representem a região do estudo) sobre o tema a ser abordado no ensaio on-farm em planejamento.
Verificação se as respostas encontradas em outros ensaios (on-farm ou nas estações experimentais) são suficientes para o balizamento de ações de manejo na área do estudo.
Definição se um ou mais ensaios on-farm, na mesma área, são necessários para responder à(s) pergunta(s) formulada(s).
Avaliação se o tema abordado no ensaio on-farm sofre grande influência das variações interanuais (clima, interação genótipo × ambiente, solo, etc.), necessitando a previsão de repetição por vários anos na mesma área.
Compartilhamento das informações sobre a filosofia de trabalho e cuidados necessários para realização de ensaios on-farm com toda a equipe de gestão e operacional da propriedade rural.
Identificação e estabelecimento, em conjunto com a equipe, de medidas mitigadoras para problemas que possam ocorrer no curso da realização dos ensaios on-farm.

disponível para conduzir o ensaio e a sua complexidade (Bramley et al., 2006).

A área selecionada pode exibir diferentes níveis de variabilidade e de detalhamento na caracterização. Para lidar com essa variabilidade, é possível utilizar o histórico da área e as ferramentas de AP. Sem a definição de Zonas de Manejo (ZMs), é possível alocar o ensaio sempre buscando dar as mesmas condições para os tratamentos, posicionando as parcelas ou faixas (tratamentos) perpendicularmente à direção da variabilidade. Assim, mesmo que afetados pela variabilidade, os efeitos seriam teoricamente equivalentes para todos os tratamentos. Por outro lado, caso a área apresente ZMs definidas, tanto os ensaios instalados em cada ZM quanto os que atravessam múltiplas ZMs tendem a produzir resultados mais uniformes quando avaliados separadamente em cada ZM.

Há outras questões fundamentais a serem consideradas no planejamento do ensaio e seus níveis são: (1) qual a distância do valor médio que um nível de tratamento deve ser posicionado para que haja diferenças significativas em rendimento e qualidade, e (2) até que ponto o produtor está disposto a aceitar uma possível perda de rendimento em tratamentos que, provavelmente, terão uma produção inferior à média da propriedade (Bramley et al., 2006).

Uma possibilidade utilizada por muitos produtores é dividir o talhão em dois ou mais tratamentos, sem repetição. Segundo Piepho et al. (2011), do ponto de vista estatístico, essa divisão do talhão consiste em uma única repetição. Isso implica que, para uma análise clássica válida, são necessários vários talhões divididos para estabelecer a significância do efeito dos tratamentos.

O tamanho das parcelas ou faixas deve ser compatível com os equipamentos utilizados em cada propriedade, considerando as variações regionais, o sistema de produção e os níveis tecnológicos adotados pelos produtores. Em geral, é indicado que a largura da parcela seja pelo menos duas vezes maior que a largura do equipamento de aplicação (Kindred et al., 2018), por exemplo, quando os tratamentos envolverem distribuição de fertilizantes a lanço com discos rotativos centrífugos. Da mesma forma, é importante que a colheita possa envolver duas ou mais passagens da colhedora por parcela. O comprimento da parcela dependerá da disponibilidade da área. Embora Kindred et al. (2018) sugiram um comprimento ideal maior que 200 m, essa dimensão muitas vezes não é viável devido às dimensões e formatos das áreas que utilizam AP em algumas regiões brasileiras.

Também é importante considerar as avaliações planejadas ao definir o tamanho das parcelas ou faixas. Por exemplo, se forem utilizadas imagens de satélite para a caracterização dos ensaios, o tamanho da parcela ou faixa deve ser compatível com o pixel da imagem utilizada, entre outros fatores relevantes. Se estiverem previstos processos de interpolação para geração de mapas de resposta, é indicado que as parcelas tenham dimensões iguais de largura e comprimento (em forma de um quadrado), com equidistância entre os pontos de amostragem no campo.

A utilização de repetições é sempre indicada em qualquer ensaio e isso não seria diferente no caso de ensaios on-farm no âmbito da AP. Quanto maior o número de repetições, maior será a confiabilidade nos resultados obtidos. Assim, não há um número definido para repetições, pois este depende de diversos fatores, como a área disponível, o desenho do ensaio

e as características dos tratamentos. Por exemplo, se a decisão for realizar ensaios em cada ZM e algumas delas tiverem dimensões reduzidas ou formato que dificulte a realização de várias repetições, isso pode se tornar uma limitação. Mesmo que se disponha de área ampla em cada ZM, é prudente evitar transformar toda a área do talhão em ensaio. Ou seja, utilizar um número tão grande de tratamentos e repetições que ocupe a área toda e que possa até mesmo aumentar a variabilidade antrópica do talhão (manchar), dependendo dos tratamentos que serão utilizados (ex.: nutrição de plantas, preparo do solo, culturas antecessoras), pode não se mostrar producente.

Na Figura 2, apresenta-se uma árvore de decisão para orientar a realização ou não de ensaios de AP on-farm. Em situações de baixa variabilidade – ou quando esta não estiver suficientemente caracterizada ou compreendida –, a indicação é a realização de um único ensaio com a identificação de um manejo ou tecnologia a ser aplicado em toda a área. Os resultados esperados desse procedimento podem ser altamente eficazes, quando a área não apresenta variabilidade significativa nos fatores condicionantes da produtividade, exceto pelas variações na resposta ao fator em estudo. Entretanto, quando a variabilidade é relevante, considerar o talhão como um todo pode resultar em erros ou, no mínimo, subaproveitamento do manejo ou tecnologia definida para aplicação. Por outro lado, se a área já foi devidamente caracterizada e as ZMs foram definidas, é possível realizar inferências específicas para cada uma delas. Isso pode ser feito por meio da realização de ensaios em cada ZM ou por meio de faixas alocadas estrategicamente para atravessar as diferentes ZMs.

As Figuras 3 e 4 exemplificam o formato de realização de ensaios on-farm para as diversas situações descritas na Figura 2. Na prática, cada estratégia apresenta benefícios e limitações, necessitando de escolha correta e ajustes para o melhor desempenho na obtenção do resultado pretendido.

A Figura 3 representa a realização de ensaios on-farm em áreas que não dispõem de caracterização suficiente e/ou as ZM não foram previamente definidas. Uma das principais dificuldades é a falta de controle sobre a variabilidade existente, refletida na variação observada no rendimento de grãos. Nesse caso, as faixas com os tratamentos devem ser suficientemente longas, para acomodar repetições, ou devem ser inseridas faixas menores de cada tratamento em vários pontos do talhão.

Uma das formas de reduzir o problema da falta de áreas homogêneas identificadas é a alocação de faixas com tratamentos distintos acompanhando toda a área do talhão.

No caso de existir a caracterização da área com ZMs definidas, o planejamento dos ensaios on-farm pode ser melhor direcionado. Conforme ilustrado na Figura 4, as ZMs bem definidas e com certo nível de estabilidade possibilitam a alocação dos ensaios em parcelas ou faixas especificas dentro de cada ZM ou atravessando as diferentes ZMs. Se forem considerados a disponibilidade de equipamentos para a implementação, juntamente com o monitoramento e a colheita automatizados, esses ensaios tornam-se de execução relativamente simples. Além disso, proporcionam uma ampla gama de informações em resposta às perguntas formuladas, subsidiando as decisões práticas para aplicação de manejo sítio-específico na fazenda.

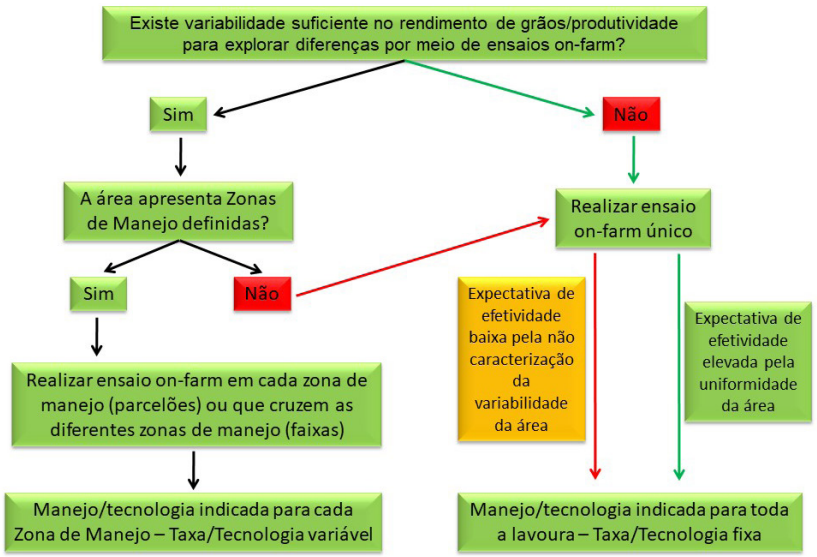


Figura 2. Árvore de decisão para realização de ensaios on-farm no âmbito da Agricultura de Precisão.

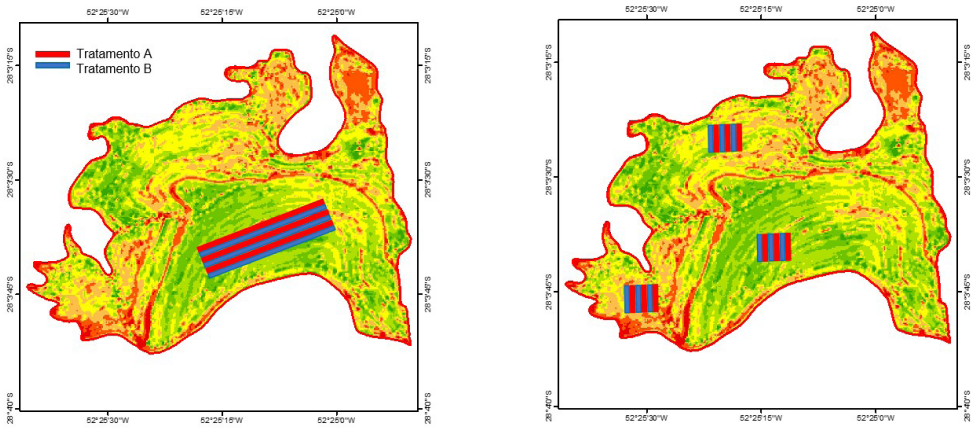


Figura 3. Exemplos de alocação de parcelas ou faixas a partir de um mapa de rendimento de grãos, para avaliação de tratamentos em talhões que não dispõem de caracterização e identificação de Zonas de Manejo.

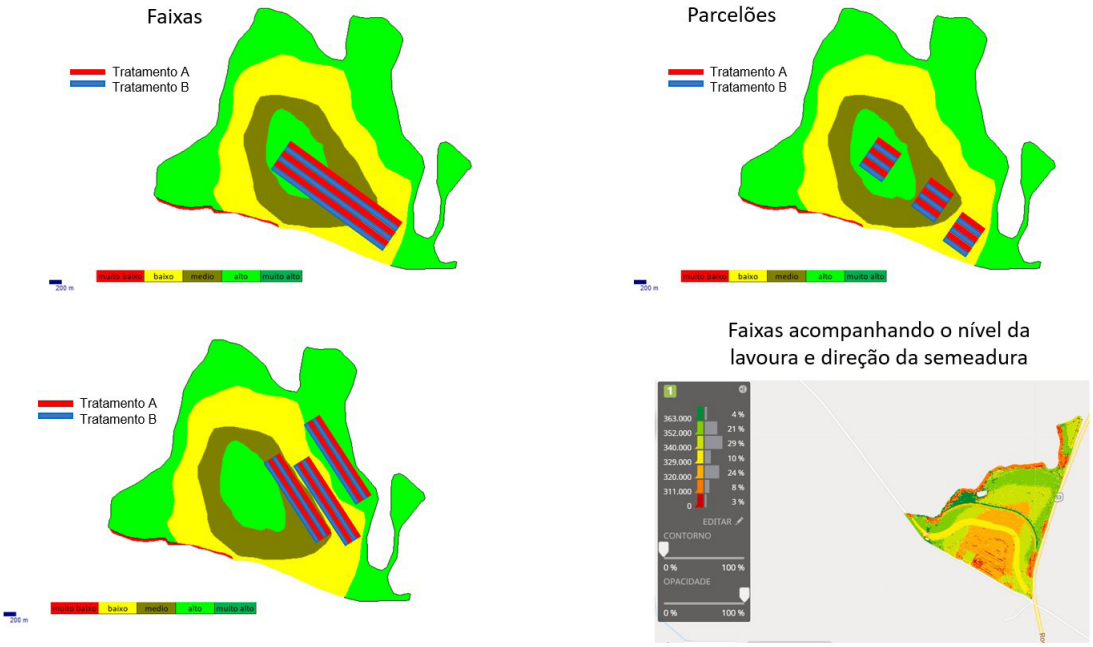


Figura 4. Exemplos de alocação de parcelas/faixas para avaliação de tratamentos em talhões que dispõem de melhor caracterização e de Zonas de Manejo identificadas.

Na Tabela 2, são sumarizadas algumas sugestões de etapas/procedimentos a serem considerados no planejamento dos ensaios on-farm.

4 IMPLANTAÇÃO E CONDUÇÃO DE ENSAIOS ON-FARM

Os ensaios on-farm, utilizados como ferramentas dos ciclos de AP, devem ser implantados e conduzidos pelos produtores rurais com o suporte da assistência técnica, representada por agrônomos, técnicos agrícolas, consultores especializados da área, pesquisadores, entre outros profissionais capacitados. Essa abordagem não é conflitante com a utilização de ensaios on-farm com propósitos de apoio à pesquisa realizada nas estações experimentais, muitas vezes utilizados para representar as condições "reais" de cultivo comercial empregadas pelos produtores. Nesse contexto, as pesquisas podem aproximar pesquisadores, professores e estudantes (tanto de graduação e como de pós-graduação) das equipes das fazendas, trazendo benefícios tanto para as pesquisas (com ou sem foco em AP) quanto para os produtores, com resultados que podem ser aplicados na prática.

Tabela 2. Resumo dos principais passos na fase de planejamento de ensaios on-farm no contexto da Agricultura de Precisão.

Procedimentos no planejamento de ensaios on-farm
Definição clara do objetivo do ensaio.
Definição dos tratamentos necessários (que devem ser os mais simples possíveis), preferencialmente, enfocando somente um fator (densidade de semeadura, cultivares, adubação, manejo fitossanitário, entre outros).
Os níveis dos tratamentos quantitativos não devem ser muitos (de três a quatro, preferencialmente). Se forem três, utilizar o nível de tecnologia já utilizado na área, com variação de um tratamento abaixo e outro acima desse nível. No caso de quatro tratamentos, dar preferência para o uso de dois acima e dois abaixo da média empregada na lavoura.
Inclusão de um tratamento controle (testemunha), geralmente representando o padrão do agricultor.
Escolha de área (talhão) apropriada, conforme o objetivo do ensaio e os tratamentos.
Obtenção e organização de informações sobre o histórico e a caracterização da área.
Caracterização atual do solo (amostragem em grade para análise de fertilidade e mapeamento de condutividade elétrica) e de outros fatores que, porventura, variem na área, a fim de alocar o ensaio considerando as variabilidades mais relevantes.
Confirmação se a variabilidade existente na área justifica a realização de ensaio on-farm para o tema em pauta.
Identificação de possíveis Zonas de Manejo (ZMs), a fim de definir desenho de ensaio mais apropriado e a necessidade de replicação ou não do mesmo nas diferentes ZMs.
Desenho espacial do ensaio, preferencialmente, com repetições e aleatorização.
Definição do desenho e do tamanho de parcelas/faixas a serem utilizadas para alocação dos tratamentos, de acordo com as necessidades de resposta e a disponibilidade de infraestrutura da propriedade rural.
Largura das parcelas/faixas do ensaio com dimensão compatível, normalmente múltipla combinada das larguras de trabalho dos principais equipamentos que serão utilizados (semeadora, distribuidor de fertilizantes, pulverizador, colhedora).
Prospecção de suporte/parceria de outros agricultores, revendas, prestadores de serviço de AP, consultores, instituições de pesquisa e extensão rural e universidades.

É necessário que o produtor forneça dados sobre a(s) área(s) a ser(em) utilizada(s), como histórico de cultivo, mapeamento de características de solo (preferencialmente de vários anos), mapas de colheita de várias safras, zonas de manejo (se já caracterizadas), manejo realizado, entre outros. Além disso, espera-se que realize a implementação e condução do ensaio on-farm. O técnico pode auxiliar no acompanhamento das áreas, na tabulação dos dados, na realização das interpretações necessárias e, em conjunto com o produtor, na definição das intervenções de manejo mais apropriadas.

Na implementação do ensaio, é importante o alinhamento de toda a equipe da fazenda, com conhecimento dos objetivos, métodos e cuidados na condução e nas avaliações. Idealmente, os equipamentos necessários, como semeadoras, pulverizadores e colhedoras, devem estar disponíveis na propriedade. É indicado que esses equipamentos sejam dotados com sistemas de orientação por satélite para garantir o controle preciso das aplicações dos tratamentos. Além disso, é importante contar com colhedoras equipadas com sensores de produtividade para a geração de mapas de colheita. As máquinas e os equipamentos necessários devem estar disponíveis durante o período planejado, com todas as regulagens necessárias e ajustes de sensores feitos previamente. Deve-se ter muita atenção para evitar a introdução de outras variáveis além dos tratamentos a serem implementados, a fim de evitar confundimento nos resultados. Existem situações que devem ser previstas e evitadas por meio de uma programação cuidadosa das operações. Por exemplo, é importante evitar semear parte dos tratamentos em um dia e a outra parte no dia seguinte. Outro cenário a ser considerado é o início da semeadura do ensaio com uma determinada fórmula ou fonte de nutrientes, que pode se esgotar, resultando na necessidade de se utilizar outra fórmula ou fonte para os tratamentos restantes.

Outros fatores que podem interferir na experimentação on-farm são mais difíceis de prever e controlar, incluindo-se desde o risco de deriva de adubo durante a distribuição a lanço, devido à presença e ao sentido do vento durante a aplicação de tratamentos de adubação, até mudanças repentinas nas condições meteorológicas durante operações críticas, como chuva constante após o início da semeadura, o que pode atrasar a conclusão dos experimentos em áreas extensas. Os problemas de deriva e de condições meteorológicas adversas também podem afetar a eficácia dos tratamentos fitossanitários (pulverizações de defensivos) e influenciar na produtividade em deter-

minadas partes do experimento. Para amenizar essas interferências no planejamento experimental, é indicado considerar um tamanho de parcela adequado, com bordaduras amplas e, sempre que possível, um maior número de repetições. Além disso, aumentar o número de pontos de mensuração de variáveis dentro de cada parcela no campo pode ajudar a melhorar a representatividade nas avaliações dos tratamentos.

Na Tabela 3, são sumarizadas algumas sugestões de etapas/procedimentos a serem levados em consideração na implantação e condução dos ensaios on-farm.

5 AVALIAÇÕES, ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE ENSAIOS ON-FARM

Quanto mais informações forem coletadas em um ensaio on-farm, mais completa será a caracterização e mais útil será para a interpretação dos resultados e a tomada de decisão de manejo. No entanto, é fundamental que as avaliações sejam coerentes com o objeto do ensaio e que haja relevância da avaliação para as respostas desejadas e viabilidade de realizá-las. Atualmente, pode-se pensar também na divisão das avaliações, sendo parte realizada pela própria fazenda e parte fornecida por prestadores de serviço em AP, como já se faz em algumas regiões do País. Entretanto, a orientação e o acompanhamento por pessoas com qualificação técnica e científica não podem ser dispensados.

A maioria das avaliações agronômicas realizadas na experimentação tradicional pode ser feita também nos ensaios on-farm, inclusive manualmente, com auxílio de GPS para capturar as coordenadas geográficas dos locais amostrados no campo. Todavia, esse processo é mais trabalhoso e deve ser compatível com o quadro de pessoal de apoio disponível. As informações coletadas dessa forma podem ser processadas na abordagem da AP, utilizando-se sistemas de geoprocessamento e até aplicando-se análises geoestatísticas.

Os mapas de colheita gerados devem ser avaliados e processados com critério, especialmente em áreas

Tabela 3. Resumo das principais indicações nas fases de implantação e condução de ensaio on-farm no âmbito da Agricultura de Precisão.

Procedimentos na implantação e condução de ensaios on-farm
Mesmo dispondo de sistemas de orientação por satélite (GPS e sistemas de guia), é conveniente instalar marcações físicas permanentes (estacas, postes, bandeiras, etc.) nas extremidades do ensaio on-farm, indicando os alinhamentos de início e de fim. Esse cuidado é especialmente relevante quando o ensaio se repete por mais de um cultivo, ou quando as parcelas não têm dimensões folgadas em largura e comprimento, ou em situações com menor precisão nos equipamentos/sinais de satélite, podendo ocasionar erros de posicionamento maiores que 1 m.
Utilização da mesma máquina/equipamento para a implantação de todo o ensaio, especialmente quando os tratamentos são implementados no momento da semeadura.
Ajuste/calibração prévia dos sistemas/sensores utilizados para a aplicação e registro dos tratamentos.
Evitar início do ensaio nas bordas da lavoura, nas quais ocorre maior tráfego de máquinas, eventuais problemas de compactação e maior incidência de pragas.
Semeadura do ensaio de acordo com o planejamento realizado, respeitando o tamanho e a posição de parcelas/faixas.
Checagem dos tratamentos, por exemplo, fazendo contagem de sementes depositadas no sulco de semeadura, especialmente quando o trabalho envolver variação na densidade de plantas.
Obtenção, se possível, do mapa de aplicação dos tratamentos por meio do equipamento utilizado, para certificar que foram implementados de acordo com o planejado ou quais variações ocorreram em relação ao planejado.
Uniformização de todas as outras práticas utilizadas na condução do ensaio (data de semeadura, adubações foliares, controle fitossanitário, etc.), para não causar confundimento entre tratamentos e manejo utilizados.
Registro dos estádios fenológicos e respectivas operações de manejo e avaliações realizadas ao longo do ciclo da cultura.
Monitoramento direto ou por sensoriamento remoto (imagens aéreas/satélites/avaliação de sensores proximais, entre outros) durante a safra, a fim coletar dados que auxiliem no entendimento das respostas aos tratamentos e na identificação de fatores que possam influenciá-las.
Colheita do ensaio com monitor de produtividade, respeitando os tratamentos, utilizando a mesma colhedora, de preferência num único dia, e no sentido das linhas de semeadura (evitar colheita no sentido transversal ao da parcela/faixa).
Registro e arquivo dos dados meteorológicos, a partir de estação situada o mais próximo possível da área do ensaio, para posterior análise e associação aos resultados experimentais.
Repetição dos tratamentos no tempo, se possível ao longo de várias safras e em cultivos diversificados. Esse procedimento dilui o efeito de fatores não controlados, além de conferir maior consistência e confiabilidade às conclusões do estudo.

nas quais a colheita não foi realizada em toda a largura da plataforma de corte, bem como no início e no final das faixas de corte (Kindred et al., 2018).

A análise de resultados pode ser feita de forma simples, comparando as médias dos tratamentos e avaliando se as diferenças observadas são reais ou não. No entanto, uma abordagem estatística pode tornar a interpretação mais robusta (Nielsen, 2008). A escolha entre esses métodos depende de vários fatores, incluindo a estrutura da variabilidade da área, o delineamento do ensaio, os tratamentos aplicados e as condições durante a condução do ensaio, entre outros.

Na Tabela 4, são sumarizadas algumas sugestões de etapas/procedimentos nas avaliações, na análise e na interpretação dos resultados de ensaios on-farm.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização de ensaios on-farm, no contexto da AP, pode fornecer informações valiosas para orientar as decisões sobre as intervenções necessárias para aumentar a competitividade e sustentabilidade das culturas produzidas em larga escala no Brasil. Para tanto, é essencial definir claramente o problema e as hipóteses técnicas a serem testadas, observando determinados princípios e adotando metodologias adequadas para cada realidade de produção. O ensaio deve ser simplificado e automatizado sempre que possível. Além disso, é fundamental que seja conduzido de forma eficiente para que os resultados estejam disponíveis para uso o mais rapidamente possível. Deve-se ter cuidado com possíveis confundimentos e observar a abrangência da aplicação dos resultados obtidos. Evidenciou-se, no trabalho realizado na Rede AP da Embrapa, pelas diferentes equipes e locais do País, que existe grande variabilidade no grau de evolução da AP e no uso de ferramentas, como as dos ensaios on-farm, no manejo das culturas. Enquanto alguns produtores estão dando os primeiros passos em AP, conduzindo experimentos preliminares com ensaios on-farm, outros já

Tabela 4. Resumo das principais indicações na fase de avaliações de ensaios on-farm no âmbito da Agricultura de Precisão.

Procedimentos nas avaliações, análise e interpretação de ensaios on-farm
Foco nas avaliações necessárias para responder à(s) pergunta(s) formulada(s) na definição do ensaio.
Automatização das avaliações sempre que possível, para reduzir custos e aumentar a eficiência operacional.
Registro de possíveis ocorrências (de manejo, de clima ou de pragas/doenças/plantas daninhas) que confundam ou até inviabilizem o aproveitamento do ensaio. Ferramentas tecnológicas disponíveis podem facilitar esse registro (imagens de satélite, imagens de drones, mapas gerados por sensores embarcados em tratores e pulverizadores, vistorias presenciais com registros de ocorrências por meio de aplicativos que permitam georreferenciamento, entre outros).
Calibração de sensores dos equipamentos utilizados para avaliações.
Checagem e calibração prévias, para que todos os equipamentos estejam funcionando corretamente na colheita, evitando perda de sinal de GPS (por exemplo) e de dados.
Amostragens (manuais ou monitoramento de colheita) direcionadas especialmente à área útil central das parcelas. Registros nas bordas são mais sujeitos a erros e interferências de tratamentos vizinhos.
Colheita no sentido das linhas de semeadura. A colheita transversal às parcelas pode provocar erros no mapa de rendimento, especialmente quando as parcelas são de largura reduzida.
Colheita de todo o ensaio no mesmo dia e com a mesma máquina, para obtenção de mapa de rendimento de melhor fidedignidade.
Colheita de cada parcela/faixa do ensaio com um número pré-determinado de passadas do equipamento, colhendo com a largura total da plataforma.
Geração do mapa de colheita após eliminação de valores atípicos e erros conhecidos, aplicando-se procedimentos matemáticos adequados e filtros para cada situação.
Parceria com consultores, instituições de pesquisa e extensão rural, universidades e outros, para suporte na integração, análise e interpretação de resultados.
Análise dos resultados o mais breve depois da colheita, para que seja possível realizar intervenções/modificações de manejo na safra seguinte, quando for o caso.
Repetição do ensaio com os mesmos tratamentos por mais anos, a fim de representar a variação interanual no ambiente de produção e suas interações com os tratamentos.
Se necessário, repetir o ensaio por mais anos, observar os cuidados dependendo do fator em estudo (ex: níveis de adubação N-P_2O_5-K_2O), para não realizar no mesmo local, com aumento do risco de confundimento dos resultados pelo possível resíduo do ensaio anterior, a não ser que o objetivo seja avaliar justamente o efeito residual de adubações, de culturas e práticas anteriores, entre outros.

acumulam uma quantidade considerável de dados e dispõem de sistemas de suporte para tomada de decisão altamente assertivos. Essa disparidade de acesso e adoção de novas tecnologias é uma realidade comum em um cenário diversificado como é o setor agrícola. Considera-se esse um processo natural, que tem ocorrido em outras regiões agrícolas no mundo e que apresenta grande potencial de crescimento no Brasil. Isso é particularmente verdadeiro, se houver uma maior coordenação entre as ações de diferentes segmentos e entidades, tanto públicas quanto privadas, que atuam na área de Agricultura de Precisão.

REFERÊNCIAS

BRAMLEY, R.; COOK, S.; ADAMS, M.; CORNER, R. **Designing your own on-farm experiments**: how PA can help. Canberra: Grains Research & Development Corporation (GRDC), CSIRO Land and Water, 2006. 36 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/237129977_Designing_your_own_on-farm_experiments_How_precision_agriculture_can_help. Acesso em: 10 dez. 2021.

KETTERINGS, Q.; CZYMMEK, K.; GABRIEL, A. **On-farm research**. Ithaca: Cornell University Cooperative Extension, 2012. 2 p. (Agronomy Fact Sheet Series, 68). Disponível em: http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet68.pdf. Acesso em: 20 jul. 2022.

KINDRED, D.; CLARKE, S.; ROQUES, S.; HATLEY, D.; BERRY, P.; SYLVESTER-BRADLEY, R. **Guide to farmers' crop trials**. London: ADAS Agronomics, 2018. 12 p. Disponível em: https://www.yen.adas.co.uk/sites/default/files/2019-10/ADAS%20Guide%20to%20Farm%20Trials.pdf. Acesso em: 20 jul. 2022.

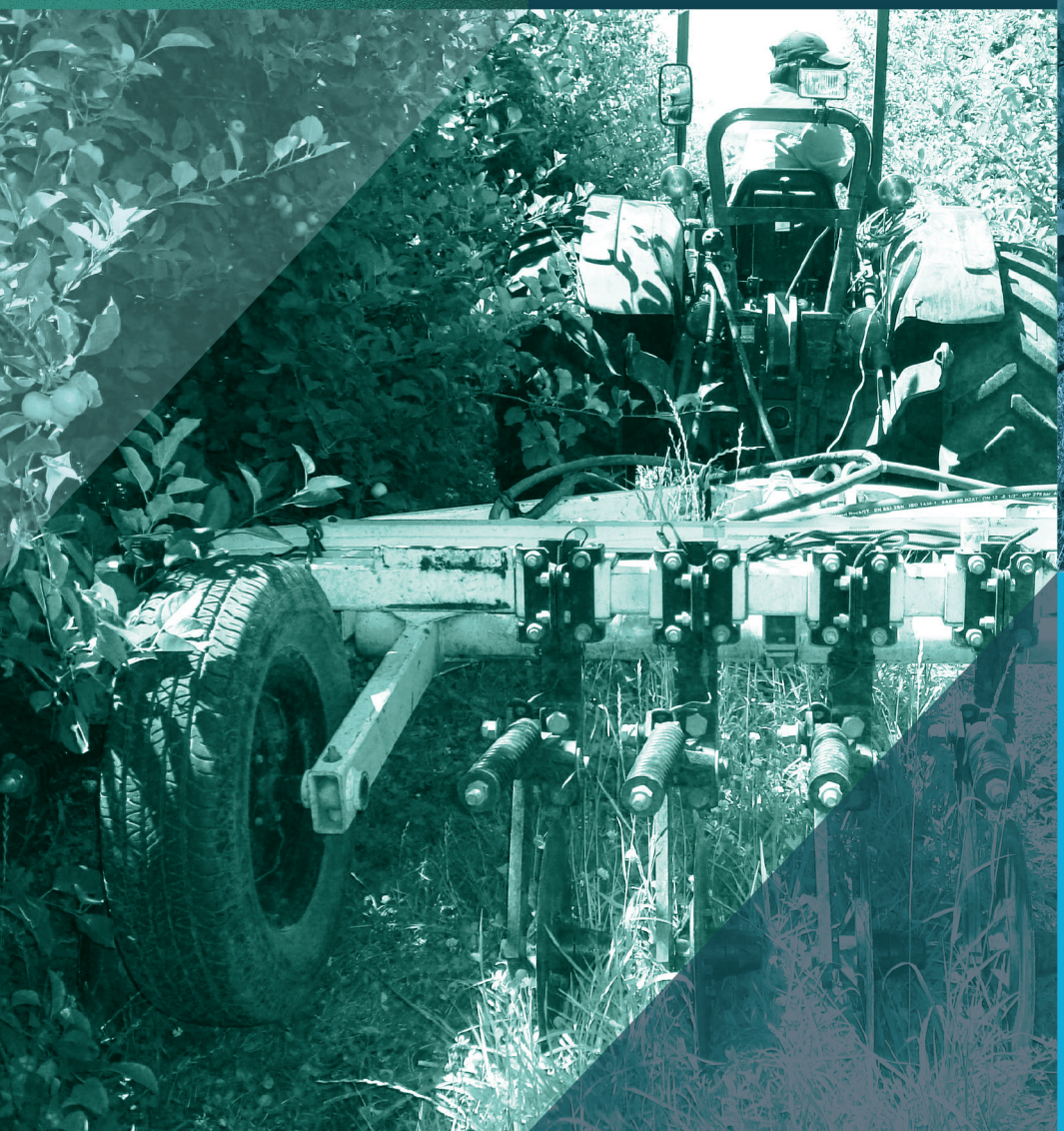
NIELSEN, R. L. **A practical guide to on-farm research**. West Lafayette: Purdue University, 2008. Disponível em: https://www.agry.purdue.edu/CCA/2008/Proceedings/NielsenResearch.pdf. Acesso em: 22 abr. 2022.

PIEPHO, H. P.; RICHTER, C.; SPILKE, J.; HARTUNG, K.; KUNICK, A.; THÖLE, H. Statistical aspects of on-farm experimentation. **Crop & Pasture Science**, v. 62, p. 721-735, 2011. DOI: http://doi.org/10.1071/CP11175.

Seção 3

Culturas Perenes

UCS
DE VACARIA
FALKER



Seção Culturas Perenes

A agricultura de precisão e digital aplicada a culturas perenes apresentou uma grande evolução nos últimos dez anos. Deve-se ressaltar que ela é diferente daquela praticada para a produção de grãos e fibras para consumo, transformação ou processamento, onde a quantidade do produto agrícola obtida é priorizada e a qualidade, em alguns casos, não é considerada. Para culturas perenes, cujos produtos dependem da escolha do consumidor para serem adquiridos, a qualidade é também fator preponderante, exigindo novas formas de aplicar a agricultura de precisão e digital.

O projeto em rede de agricultura de precisão da Embrapa buscou elucidar essas diferenças, trabalhando com algumas espécies perenes e semiperenes que serviram de modelo para desenvolver, adaptar e avaliar formas de usar a agricultura de precisão para essa nova demanda, a inclusão do fator qualidade no contexto da variabilidade espacial. Para isso, iniciou-se a avaliação do impacto que os fatores fisiológicos têm sobre a resposta da planta no estudo da variabilidade do ambiente. Ao mesmo tempo, outro fator pouco considerado anteriormente passou a merecer destaque, que é a variabilidade temporal que tais culturas, fixas na mesma área ao longo do tempo, também variavam a resposta devido às alterações de clima e na fisiologia das plantas.

Assim, os últimos anos do projeto em rede de agricultura de precisão da Embrapa permitiram a produção de muito conhecimento inovador nessas áreas, além de vários resultados que são apresentados nos capítulos a seguir, permitindo que hoje possa ser feita agricultura de precisão também em culturas perenes e semiperenes, com a inclusão da agricultura digital.

Nesta seção, são apresentadas tecnologias voltadas para o manejo de plantas perenes e o desenvolvimento de instrumentação eletrônica e de softwares que permitirão aos produtores e técnicos aumentar a assertividade de sua tomada de decisão. Houve grande evolução na temática do sensoriamento, principalmente o proximal, permitindo avançar não só na detecção de zonas de manejo com base na variabilidade espacial do vigor vegetativo, mas também contribuindo para detecção de pragas e doenças. Técnicas de manejo são sugeridas com base no zoneamento das quadras ou talhões de produção, e não mais pela média dessas áreas, tornando o gerenciamento mais eficaz tanto no aumento da produção e qualidade como também na redução de custos. Os instrumentos de coletas de dados para gerenciamento da produção e da logística envolvida e o avanço na área do uso de dados secundários, os metadados, demonstram os primeiros passos do uso de dados nas culturas perenes. Por fim, são trabalhos que buscam introduzir a importância da variabilidade temporal na área produtiva, demonstrando o valor de um banco de dados disponível na propriedade para uso dos técnicos e dos produtores.

É uma seção bastante extensa, com muito conhecimento disponível, gerado nessa fase final do projeto em rede de agricultura de precisão da Embrapa, considerando também a agricultura digital.

Luciano Gebler
Luís Henrique Bassoi

48

Implantação da agricultura de precisão para manejo diferenciado em sistema de produção de cafés especiais na região sul de Minas Gerais

Precision agriculture implementation for differentiated management in a specialty coffee production system in the southern region of Minas Gerais

Célia Regina Grego[1], Gustavo Costa Rodrigues[2], Cristina Aparecida Gonçalves Rodrigues[3], Eduardo Antonio Speranza[4], Ariovaldo Luchiari Júnior[5], Luciano Vieira Koenigkan[6], Carlos César Ronquim[7], Adauto Luiz Mancini[8], Débora Pignatari Drucker[9]

[1] *Pesquisadora, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, celia.grego@embrapa.br*
[2] *Pesquisador, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, gustavo.rodrigues@embrapa.br*
[3] *Pesquisadora, Embrapa Territorial, Campinas (SP), Brasil, cristina.rodrigues@embrapa.br*
[4] *Analista, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, eduardo.speranza@embrapa.br*
[5] *Pesquisador, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, ariovaldo.luchiari@embrapa.br*
[6] *Analista, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, luciano.vieira@embrapa.br*
[7] *Pesquisador, Embrapa Territorial, Campinas (SP), Brasil, carlos.ronquim@embrapa.br*
[8] *Pesquisador, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, adauto.manchini@embrapa.br*
[9] *Analista, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, debora.drucker@embrapa.br*

RESUMO

A região sul do estado de Minas Gerais é grande produtora de café classificado como especial, e a caracterização espacial dos aspectos ambientais é importante para determinar a produção e a qualidade da bebida café ao longo do talhão. Nessa linha, encontra-se em desenvolvimento um estudo de caracterização espacial dos fatores ambientais considerando a variabilidade espacial de duas regiões representativas de produção de cafés especiais (*Coffea arabica*) do sul de Minas Gerais, relacionando-os a fatores de produção e de qualidade do grão e da bebida. O estudo tem como objetivo caracterizar espacialmente os atributos do solo e os índices vegetativos das plantas nos talhões com diferentes faces de exposição ao sol durante o ciclo produtivo do café. O estudo também é piloto para o repositório de dados de pesquisa da Embrapa (Redape), onde os dados estão sendo organizados para que possam ser acessados no futuro e reusados, seja para contribuir para novas descobertas, seja para permitir a reprodução do estudo. Com o mapeamento das informações ambientais, com as zonas de manejo e as correlações entre os dados espera-se identificar a interferência na produtividade e na qualidade dos cafés produzidos nessas regiões, auxiliando o produtor na tomada de decisão para obter melhorias na produtividade.

Palavras-chave: cafeicultura de precisão; variabilidade espacial; base de dados.

ABSTRACT

The southern region of Minas Gerais state is a large producer of special coffee, as environmental aspects and the characterization of environmental aspects are important to determine the production and quality of coffee in the area. In this line, a study of spatial characterization of environmental factors is being developed, considering the spatial variability of two representative regions of production of specialty coffees (Coffea arabica) in the south of Minas Gerais, relating the factors of production, quality, and coffee drink. The study aims to spatially characterize the soil attributes and the vegetation index of the plants in the area with different faces of sun exposure, during the coffee production cycle. All data from this study were stored in Embrapa's research data repository (Redape) where the data are organized for future access and reused, either to contribute to new findings or to allow the study to be reproduced. With the mapping for environmental information, with the zones of management and

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000021

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

the correlations between the data, it is expected that the interference in the productivity and quality of the coffees in specific regions, will help the farmer in the decision-making to obtain the productivity increase.

Keywords: precision coffee growing; spatial variability; database.

1 INTRODUÇÃO

O café é uma cultura muito importante para a economia brasileira. Minas Gerais, estado que contempla a maior área de café, é responsável por aproximadamente 60% de toda a área cultivada no país. Considerando todas as regiões produtoras do estado, a área cultivada continua em expansão, sendo que em 2022 houve aumento de 2,8% em relação a 2021 (Companhia Nacional de Abastecimento, 2022).

A cafeicultura de precisão está modernizando cada vez mais o setor, principalmente quando se trata da produção de cafés especiais, que possuem valor agregado maior que o dos convencionais e exigem maiores cuidados quanto ao manejo da cultura no campo (Silva; Alves, 2013; Rodrigues et al., 2019). Aspectos importantes considerados na produção de cafés especiais, como os fatores ambientais, relevo, tipo e atributos físicos e químicos do solo, além do desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da planta, apresentam variações espaciais que devem ser consideradas.

Quando um talhão passa a ser manejado conforme as zonas diferenciadas de manejo dá, consequentemente, suporte para a identificação de padrões ambientais que resultem em melhores condições para a produção de cafés especiais e que auxiliam o produtor na tomada de decisão para obter melhorias na qualidade, sustentabilidade, menor emissão de carbono e competitividade da produção (Rodrigues et al., 2019; Speranza et al., 2019). Essa é a principal hipótese do projeto de pesquisa desenvolvido pela Embrapa Agricultura Digital de título "Caracterização ambiental dos sistemas de produção de cafés especiais em função da variabilidade espacial e suas relações com a produção e qualidade em duas regiões do sul de Minas Gerais", financiado pelo Programa do Consórcio Pesquisa Café e que se encontra em desenvolvimento desde 2019, com previsão de término em 2024.

Considerando o exposto, o objetivo deste trabalho é apresentar os resultados preliminares do estudo sobre a caracterização da variabilidade espacial do solo e da planta nas áreas de cultivo de café no sul de Minas Gerais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi iniciado no âmbito da rede de agricultura de precisão da Embrapa em 2017 e encontra-se em continuidade no projeto de pesquisa acima citado. Nos anos de estudo de 2017 a 2019 foram selecionadas as áreas – no talhão da Fazenda Santa Cruz, no município de Paraguaçu, variedade Catucaí, com aproximadamente 5 ha, e no talhão da Fazenda Morro Alto, no município de Conceição da Aparecida, variedades Catucaí IAC-144, Obatã e Catuaí Amarelo, com aproximadamente 1,5 ha (Figura 1a). A partir de 2020 houve mudança de área, devido a problemas operacionais, da Fazenda Morro Alto para área da Fazenda Roselândia, no município de Carmo do Rio Claro. A área da Fazenda Roselândia possui três talhões correspondentes às variedades Mundo Novo (2 ha), Catucaí (1,6 ha) e Arara (1,5 ha). Em meados de 2021, a área da Fazenda Santa Cruz foi muito afetada pela geada, e por isso também houve uma mudança dessa área

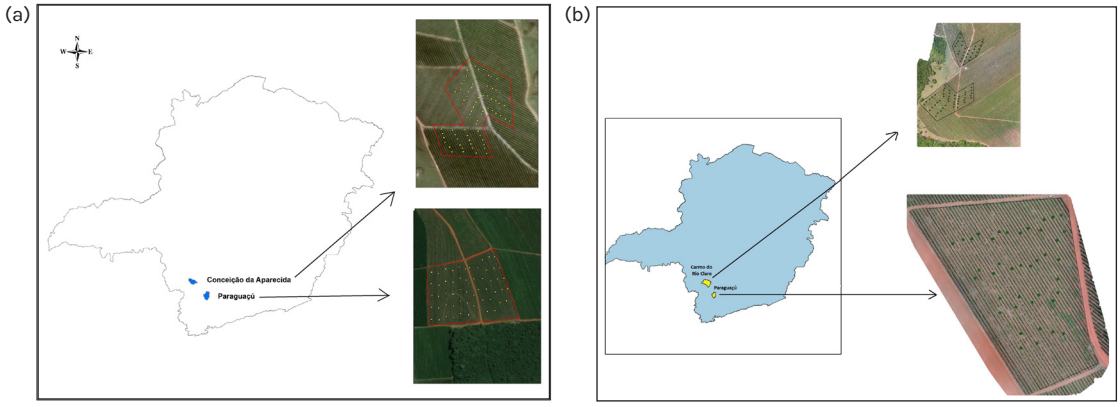


Figura 1. Áreas de estudo em talhões de café: a) Fazenda Morro Alto, em Conceição da Aparecida/MG, e Fazenda Santa Cruz, em Paraguaçu/MG; b) Fazenda Roselândia, em Carmo do Rio Claro/MG, e Fazenda Santa Cruz, em Paraguaçu/MG. Imagens obtidas por câmera com sistema de cores RGB (Red, Green and Blue) a bordo de veículo aéreo não tripulado (VANT).

de estudo para novo talhão, área de 3 ha dentro da mesma fazenda, com a variedade Catucaí (Figura 1b).

- Obtenção de imagens VANT

As áreas atuais de estudo das Fazendas Santa Cruz e Roselândia foram imageadas em novembro de 2019 e setembro de 2021 com VANT a 40 m de altura, acoplado a câmera RGB modelo DJI Mavic 2 Pro. As imagens foram importantes para verificar o desenvolvimento vegetativo das plantas no final da floração e início do desenvolvimento dos grãos.

- Coleta de dados de solo e planta

Foram amostrados 75 pontos para a Morro Alto e 56 pontos para a Santa Cruz, em 2017 (Figura 1a), no início do desenvolvimento de grãos, para obter os dados de índice vegetativo e clorofila das plantas. Nos pontos amostrais, as medidas com o sensor Crop Circle geraram o índice de vegetação da diferença normalizada pelo Vermelho (NDVI) (Rouse Júnior et al., 1974) e o índice de vegetação da diferença normalizada pelo Red-Edge (NDRE). Com o sensor SPAD-502 foram obtidos os dados de índice relativo de clorofila (IRC). A altitude local foi obtida nos pontos de coordenadas pelo GPS. No ano de 2019 também foi obtido o NDVI na Fazenda Santa Cruz. Para a área da Fazenda Roselândia (Figura 1b), foi investigada a dependência espacial nos atributos da fertilidade do solo em três variedades de café (Mundo Novo, Catucaí e Arara). O solo Latossolo Vermelho-Escuro foi amostrado a 0 cm - 20 cm de profundidade em 25 pontos georreferenciados em cada face de exposição ao sol dos talhões.

- Análises geoestatística e de agrupamento

Os dados foram analisados utilizando-se estatística descritiva e geoestatística composta pelo semivariograma ajustado para cada atributo conforme Vieira (2000). Os parâmetros de ajuste foram utilizados pelo interpolador krigagem ordinária para gerar os mapas dos atributos do solo e da planta. A partir desses mapas foram planejadas as análises de agrupamento a partir das combinações de NDVI, NDRE e IRC de entrada, obtendo-se os potenciais mapas de zonas de manejo. Para a execução dos agrupamentos foi utilizado o algoritmo Fuzzy c-means (FCM) (Kitchen et al., 2005) e definida a quantidade de grupos para as zonas de manejo para as Fazendas Morro Alto e Santa Cruz (Figura 1a). A correlação entre os mapas de zonas de manejo foi verificada com o índice *kappa* (Cohen, 1960).

- Análise de correlação para construção de regressores

Regressores foram construídos e testados para análise de correlação entre dados de solo e planta com produção de café em maio de 2021 na Fazenda Santa Cruz (Figura 1a). A colheita foi realizada em duas plantas por cada um dos 40 pontos de amostragem. Os regressores foram construídos pelo método de regressão linear, rede neural multicamadas e árvore de decisão J48 do software Weka (Quinlan, 1986). Foi utilizada a linguagem R no software Rstudio, depois usados no Weka para o aprendizado de máquina.

- Plano de gestão de dados

Todos os dados estão sendo organizados a partir do plano de gestão de dados, numa ferramenta amplamente adotada com um instrumento para assegurar as melhores práticas de gestão de dados (Michener, 2015). O plano prevê o depósito dos dados no Repositório de Dados de Pesquisa da Embrapa (Redape). De acordo com a Embrapa (2022), o Redape é uma plataforma que visa preservar e facilitar a busca por dados de pesquisa produzidos pela empresa. A plataforma permite a organização, o gerenciamento e a publicação de dados de acordo com os princípios que norteiam a gestão de dados científicos em todo o mundo, incluindo a acessibilidade, a interoperabilidade, a reprodutibilidade e o reuso. O plano está sendo colocado em execução e os dados estão sendo organizados para que possam ser acessados no futuro e reusados, seja para contribuir para novas descobertas, seja para permitir a reprodução do estudo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados submetidos a análise de dependência espacial foram interpolados e os mapas gerados conforme mostrado na Figura 2. Houve variabilidade espacial para os índices de vegetação (NDRE, NDVI), clorofila (IRC) e altitude. Na Fazenda Santa Cruz foi observada uma relação visual inversa entre altitude e NDVI, sendo que os maiores valores de NDVI foram encontrados nas áreas mais baixas do campo. Os mapas de NDRE e IRC mostram manchas de variabilidade com distribuição semelhante. Na Fazenda Morro Alto, a face da direita apresentou maior uniformidade. Tais fatos indicam, segundo Rodrigues et al. (2019), que técnicas de manejo devam ser realizadas em função dessa variabilidade.

A partir dos mapas de krigagem (Figura 2), foram executadas análises de agrupamento, utilizando-se sete combinações de atributos como dados de entrada para o algoritmo: I) NDVI, NDRE e IRC; II) NDVI e

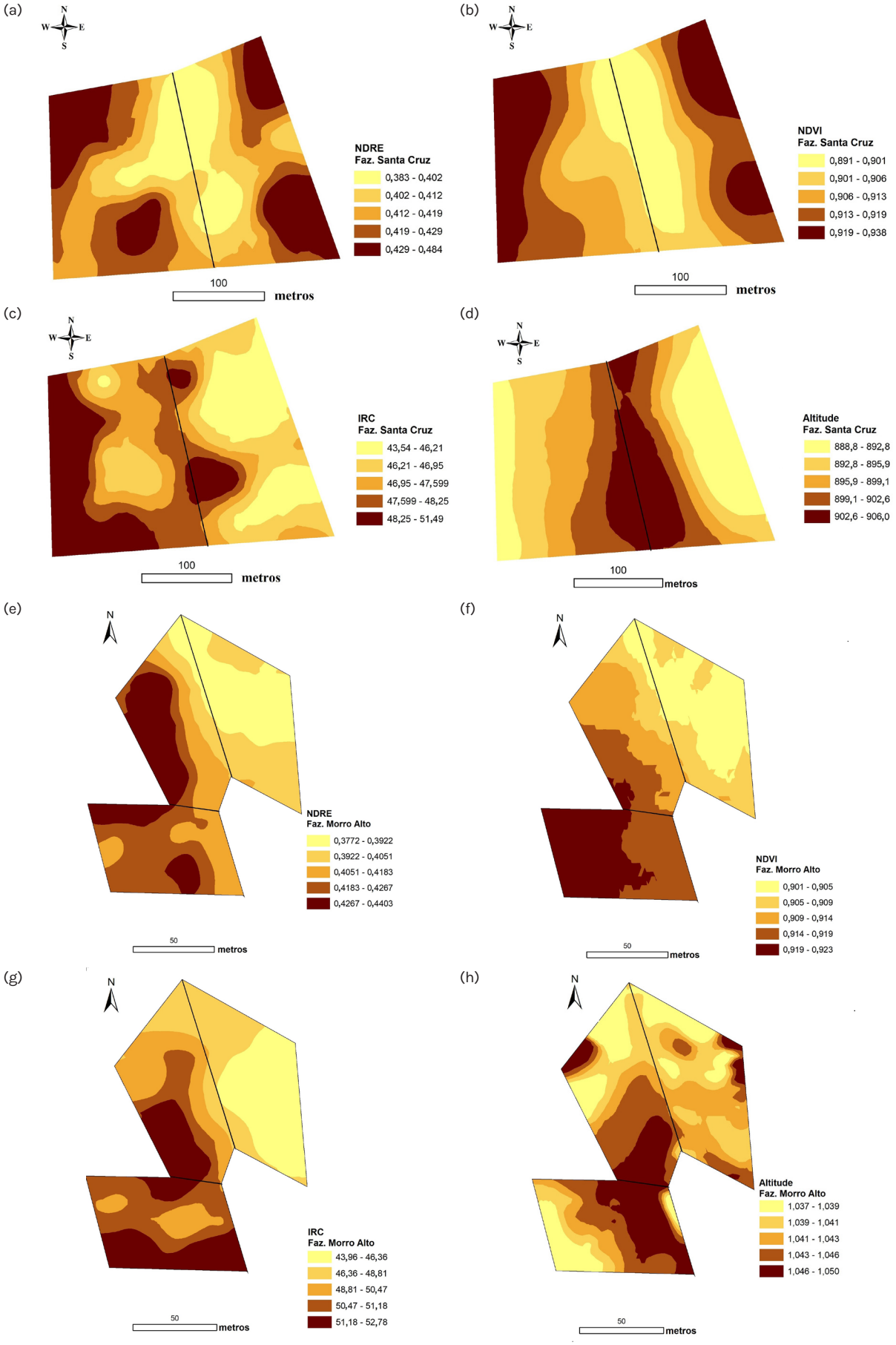


Figura 2. Mapas de valores interpolados por krigagem ordinária para os dados de: a) NDRE; b) NDVI; c) IRC; e d) Altitude, para a Fazenda Santa Cruz; e) NDRE; f) NDVI; g) IRC; e h) Altitude, para a Fazenda Morro Alto.

Tabela 1. Resultados de concordância a partir do índice *kappa* das duas áreas de estudo considerando as combinações de atributos como dados de entrada para o algoritmo: I) NDVI, NDRE e IRC; II) NDVI e NDRE; III) NDVI e IRC; IV) NDRE e IRC; V) NDVI; VI) NDRE; e VII) IRC.

Índice	Combinações (atributos de entrada)						
	(I)	(II)	(III)	(IV)	(V)	(VI)	(VII)
Fazenda Santa Cruz							
kappa	-0,09	0,09	0,04	0,44	0,03	0,11	0,52
classe (*kappa*)	pobre	leve	leve	moderada	leve	leve	moderada
Fazenda Morro Alto							
kappa	0,52	-0,47	-0,51	-0,79	-0,41	-0,44	0,77
classe (*kappa*)	moderada	pobre	pobre	pobre	pobre	pobre	substancial

Tabela 2. Análise de regressores para a fertilidade do solo na área da Fazenda Santa Cruz.

Regressor	Coeficiente de Pearson	Erro médio	Média da raiz do erro quadrático
Regressão linear	0,1038	2,4549	3,2976
Rede neural multicamadas	0,0263	2,498	3,421
Árvore de decisão	0,0936	2,4601	3,301

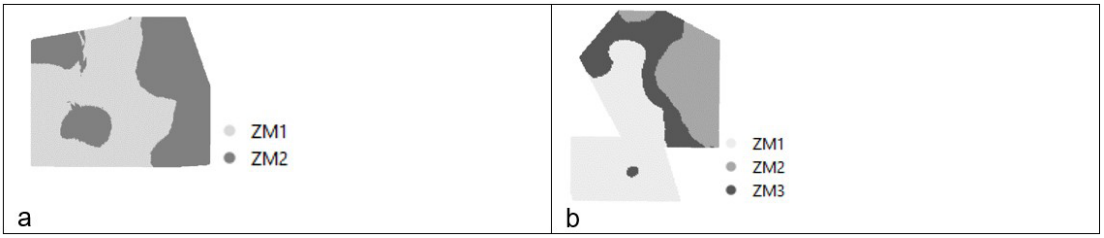


Figura 3. Potenciais zonas de manejo (identificadas por diferentes tons de cinza) considerando a combinação VII - IRC: a) Área da Fazenda Santa Cruz; b) Área da Fazenda Morro Alto.

NDRE; III) NDVI e IRC; IV) NDRE e IRC; V) NDVI; VI) NDRE; e VII) IRC (Tabela 1).

Houve concordância no máximo moderada para a área da Santa Cruz (Tabela 1) quando utilizados NDRE e IRC (IV) combinados e, principalmente, quando foi utilizado o IRC de maneira isolada (VII). Na área da Morro Alto, os melhores resultados foram obtidos utilizando-se todos os atributos (I), com concordância moderada, e utilizando-se apenas o IRC (VII), com concordância substancial. Portanto, de acordo com Speranza et al. (2019), foi evidenciado que o IRC é importante para o delineamento de zonas de manejo. Na Figura 3 são mostrados os mapas de potenciais zonas de manejo considerando o IRC com duas zonas de manejo para área da Santa Cruz e três zonas para a área da Morro Alto. Entretanto, outros dados de solo e de planta, considerando outras fases da cultura, deverão ser incluídos e explorados a fim de obter respostas conclusivas.

A análise de dependência espacial da fertilidade do solo na Roselândia (Figura 1b) permitiu o mapeamento de pH, potássio, magnésio, acidez total e saturação por bases. Os mapas da Figura 4 mostram a interpolação desses atributos, o que traz o diferencial da cafeicultura de precisão para indicação do manejo localizado do solo de acordo com cada variedade de cultivo.

Como resultado da análise de correlação com uso de regressores nos dados de solo e planta para a produção de café na Santa Cruz (Figura 1a), foram realizadas várias combinações (índices de reflectância e SPAD; NDVI e o SPAD; todas as variáveis da análise de solo e com as porcentagens de potássio, cálcio, magnésio, sódio, alumínio e hidrogênio). Na Tabela 2 temos os resultados para o uso de todos os dados da análise de solo.

Todos os algoritmos de aprendizado de máquina utilizados para previsão da produção tiveram resultados ruins. Três hipóteses são consideradas: a primei-

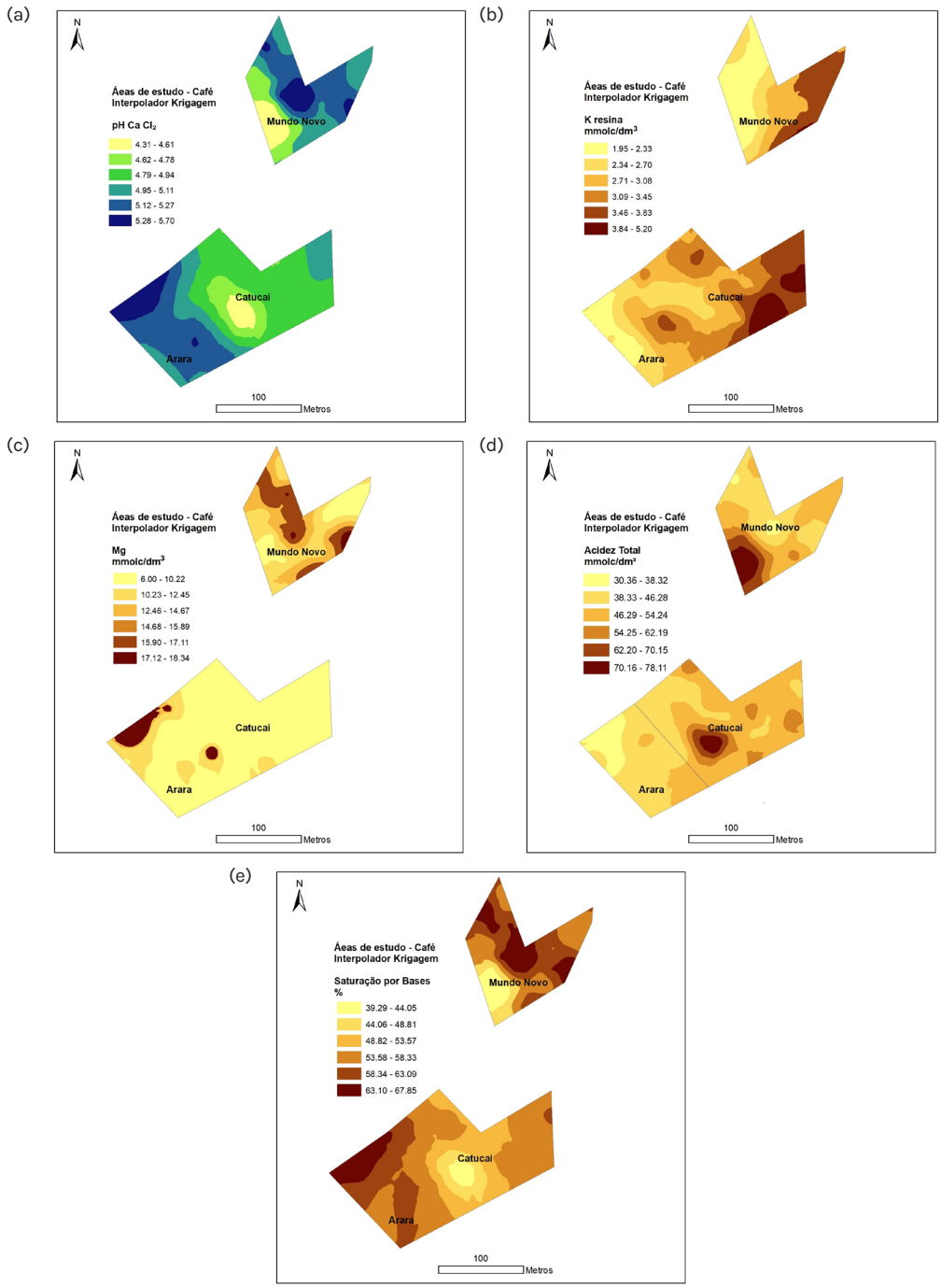


Figura 4. Mapas de valores interpolados por krigagem ordinária para a área da Fazenda Roselândia: a) $pHCaCl_2$; b) K Resina; c) Mg $mmol_c$ / dm^3; d) Acidez total $mmol_c$ / dm^3; e) Saturação por bases (%).

ra é que a ocorrência de valores muito discrepantes na produção do café interferiu na estimativa do valor da produção; a segunda é que existem poucos dados de produção (40 instâncias) para o treino dos regressores; e a terceira é que os dados apresentam uma grande complexidade para se estabelecer uma correlação com a produção. Contudo, duas tendências parecem ser indicativas para observação futura: as árvores de decisão tiveram melhor desempenho e os dados de análise de índices de vegetação foram mais eficientes do que os de solo para a previsão da produção.

Todos os dados desse estudo obtidos até o momento estão organizados no Redape, como geração de resultados do projeto no que se refere à base de dados (Grego et al., 2022). Em relação ao compartilhamento dessa base de dados, até o momento, os dados estão restritos à equipe do projeto; após a divulgação na forma de publicações técnicas, artigos científicos

ou eventos, os dados, em comum acordo com os parceiros, serão públicos.

4 CONCLUSÕES

Com base no estudo preliminar, observou-se a ocorrência de variabilidade espacial indicando que dentro dos talhões de café ocorrem manchas diferenciadas em relação ao solo e à planta, as quais devem ser consideradas no manejo da cultura. Essas constatações serão validadas incluindo-se outros dados de solo em diferentes fases fenológicas do cafeeiro. Mapas de produtividade e qualidade do grão serão correlacionados com as variáveis biofísicas e micrometeorológicas, além da inclusão e análise de atributos de solo e utilização de sensores capazes de monitorar o microclima das áreas. Esses dados servirão para potencializar as análises realizadas até o momento, proporcionando tomadas de decisão mais precisas com relação ao manejo da cultura e que priorizem melhorias na qualidade da produção de cafés especiais.

AGRADECIMENTOS

Às equipes das fazendas Santa Cruz, Morro Alto e Roselândia, pelo total apoio em campo.

REFERÊNCIAS

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, p. 37-46, 1960.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de café**. Brasília, DF: CONAB. Safra 2022, v.9, n. 3, 2022. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe. Acesso em: 27 de setembro de 2022.

EMBRAPA. **Redape – Repositório de Dados de Pesquisa da Embrapa**. Disponível em https://www.redape.dados.embrapa.br/. Acesso em: 19 de outubro de 2022.

GREGO, C. R.; SPERANZA, E. A.; KOENIGKAN, L. V.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; RODRIGUES, C. A. G.; RODRIGUES, G. C. Análise da variabilidade espacial de solo e planta do café do sul de Minas Gerais. Brasília: Embrapa/Redape, 2022. DOI: https://doi.org/10.48432/MFXQ9P.

KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; MYERS, D. B.; DRUMMOND, S. T.; HONG, S. Y. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 285-308, 2005. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.012.

MICHENER, W. K. Ten simple rules for creating a good data management plan. **PLoS Computational Biology**, v. 11, n. 10, p. e1004525, 2015. DOI: http://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1004525.

QUINLAN, J. R. Induction of decision trees. **Machine Learning**, v. 1, n. 1, p. 81-106, 1986. DOI: http://doi.org/10.1007/BF00116251.

RODRIGUES, G. C.; GREGO, C. R.; LUCHIARI, A.; SPERANZA, E. A. Caracterização espacial de indices de vegetação índice relativo de clorofila em áreas de produção cafés especiais no sul de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 10., 2019, Vitória. **Anais [...]**. Vitória: Embrapa, 2019

ROUSE JÚNIOR, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: GODDARD SPACE FLIGHT CENTER 3D ERTS-1 SYMP, v. 1, seção A, 1974, Greenbelt. **Proceedings [...]**. Greenbelt: NASA, 1974.

SILVA, F. M.; ALVES, M. C. **Cafeicultura de precisão**. Lavras: Editora UFLA, 2013. 227 p.

SPERANZA, E. A.; GREGO, C. R.; RODRIGUES, G. C.; LUCHIARI, A. Influência das diferentes faces de exposição ao sol na caracterização da variabilidade espacial de culturas de café. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA (SBIAGRO), 12., 2019, Indaiatuba. **Anais [...]**. Indaiatuba: Embrapa, 2019.

VIEIRA, S. R. Uso de geoestatística em estudos de variabilidade espacial de propriedades do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (orgs.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

49

Agricultura de precisão e experimentação on-farm na cana-de-açúcar e estudo de caso para validação das zonas diferenciadas de manejo numa área produtiva

Precision agriculture and on-farm experimentation with sugarcane and case study for validation of differentiated management zones in a productive area

Célia Regina Grego[1], Cristina Aparecida Gonçalves Rodrigues[2], Eduardo Antonio Speranza[3], Ariovaldo Luchiari Júnior[4], Carlos César Ronquim[5]

[1] *Pesquisadora, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, celia.grego@embrapa.br*
[2] *Pesquisadora, Embrapa Territorial, Campinas (SP), Brasil, cristina.rodrigues@embrapa.br*
[3] *Analista, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, eduardo.speranza@embrapa.br*
[4] *Pesquisador, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, ariovaldo.luchiari@embrapa.br*
[5] *Pesquisador, Embrapa Territorial, Campinas (SP), Brasil, carlos.ronquim@embrapa.br*

RESUMO

A cana-de-açúcar ocupa grandes extensões de área principalmente no estado de São Paulo, o maior produtor nacional. Essas áreas de cultivo necessitam ser manejadas com tecnologias modernas que tragam maiores retornos financeiros ao produtor e menores impactos ao ambiente. Na adoção da agricultura de precisão (AP), dados de atributos do solo aliados aos índices vegetativos da cultura obtidos por sensoriamento podem gerar mapas com distintas zonas de manejo capazes de expressar a variabilidade espacial da área de cultivo da cana-de-açúcar e que podem ser correlacionados com a produtividade. Dentro dessa abordagem, o objetivo deste trabalho é revisar o estado da arte do on-farm em cana-de-açúcar e relatar o ensaio on-farm quanto a adubações diferenciadas em cada zona de manejo de área de cultivo da cana-de-açúcar na Fazenda Santa Helena, arrendada pela Usina Santa Cruz, localizada no município de Ibaté/SP. Os estudos indicam que o on-farm na cana-de-açúcar, além de proporcionar melhor interação com o produtor, atendendo as necessidades para teste e validação da agricultura de precisão, leva a melhorias na produtividade da cultura o mais próximo possível de seu máximo potencial produtivo, redução dos custos e minimização dos impactos negativos ao meio ambiente. Quanto ao estudo de caso, o diagnóstico de duas zonas diferenciadas de manejo foi útil para a alocação dos tratamentos do experimento on-farm em faixas, e a melhor resposta da produtividade da cana foi para a adubação sólida de 30 kg de N ha-1, validando assim a AP na tomada de decisão de manejo da cultura.

Palavras chaves: variabilidade espacial; adubação nitrogenada; produtividade.

ABSTRACT

Sugarcane occupies large areas in Brazil, mainly in the State of São Paulo, the largest national producer. These cultivation areas require modern technological management that provides greater financial returns for the producer while minimizing environmental impacts. In adopting Precision Agriculture (PA), soil attribute data, combined with crop vegetative indices obtained by sensing, can generate maps presenting different management zones that express the spatial variability of the sugarcane cultivation area and that can be correlated with productivity. Working within this approach, the present study sought to review the state of the art for on-farm sugarcane and report on-farm test results for differentiated fertilization in each management zone of the sugarcane cultivation area on the Santa Helena farm, leased by Usina Santa Cruz, located in the municipality of Ibaté, SP. We found that on-farm sugarcane, in addition to providing greater ease for the producer, meets testing and validation

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000022

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

requirements for PA, leading to improved crop productivity at near maximum potential, cost reductions, and reduced environmental impacts. Regarding the case study, the investigation of two different management zones proved useful for allocating the treatments for the on-farm experiment in strips, while the best sugarcane productivity response was observed for 30kg of solid N ha-1 fertilizer, thereby validating PA for crop management decision-making.

Keywords: spatial variability; nitrogen fertilization; crop production.

1 INTRODUÇÃO

A aplicação on-farm vem sendo cada vez mais aprimorada tecnicamente e utilizada pelos produtores de cana-de-açúcar *(Saccharum officinarum L.)* e agroindústria canavieira, principalmente nos dois últimos anos. O termo on-farm, ou seja, dentro da fazenda, diz respeito, principalmente, à produção de insumos biológicos (bioinsumos) para uso próprio, dentro da própria propriedade agrícola. Por definição do Programa Nacional de Bioinsumos (Brasil, 2023) criado por Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020, bioinsumo é o produto, o processo ou a tecnologia de origem vegetal, animal ou microbiana, destinado ao uso na produção, no armazenamento e no beneficiamento de produtos agropecuários, nos sistemas de produção aquáticos ou de florestas plantadas, que interfiram positivamente no crescimento, no desenvolvimento e no mecanismo de resposta de animais, de plantas, de microrganismos e de substâncias derivadas e que interajam com os produtos e os processos físico-químicos e biológicos.

Inicialmente, os bioinsumos eram mais utilizados no cultivo de grãos, como a soja, e agora, de forma rápida e crescente, para uso na cafeicultura (controle biológico), para a cana-de-açúcar (controle biológico e biofertilizante) e outras culturas. Conforme nota técnica da Embrapa (2021), a qualidade do produto biológico on-farm é essencial para que se possam promover os efeitos desejados, tanto para a promoção de crescimento vegetal quanto para o controle de insetos, pragas e doenças. Mas, conforme Bocatti et al. (2022) e Embrapa (2021), a produção on-farm pode trazer riscos para as culturas, para a saúde e para a cadeia produtiva caso não sejam observados três princípios básicos na produção de insumos biológicos por produtores (produção on-farm): 1- permitir a multiplicação apenas de microrganismos que constam das listas oficiais do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA); 2- necessidade de cadastro de estabelecimento produtor de bioinsumos junto ao MAPA; e 3- necessidade de um responsável técnico habilitado para a produção de bioinsumos nas fazendas.

Sob outro aspecto, ainda dentro da agricultura de precisão (AP) e aplicação "on-farm", existem os ensaios on-farm (ensaios na fazenda), os quais dizem respeito ao uso de novas tecnologias que são pesquisadas, testadas e validadas em campo na área cultivada da própria fazenda que se quer estudar/avaliar (Pires; Brandão, 2022). A intenção da experimentação on-farm é detectar as melhores opções de uso das tecnologias testadas para elevar a produtividade da cultura o mais próximo possível de seu máximo potencial produtivo. Normalmente, esses ensaios são desenvolvidos em ações conjuntas entre os produtores rurais ou empresas de agronegócio e técnicos especializados na condução de experimentos e delineamentos experimentais a serem utilizados em campo. Os experimentos são voltados à solução de problemas práticos de campo como manejo, qualificação e quantificação de produtos, determinação do ciclo agronômico ótimo da cultura, entre outros. No documento de Pires e Brandão (2022) são apresentados e discutidos nove estudos de caso de ensaios on-farm, realizados no âmbito do Projeto Embrapa Tecnologias Habilitadoras 1 para automação e AP, com diferentes sistemas de produção em diferentes regiões do Brasil.

Portanto, mesmo a produção on-farm de bioinsumos necessitará de experimentação em campo (ensaio on-farm) voltada à validação dos novos produtos ou processos on-farm. Isso exposto, o objetivo deste trabalho é revisar o estado da arte do on-farm em cana-de-açúcar e relatar o ensaio on-farm quanto a adubações diferenciadas em cada zona de manejo de área de cultivo da cana-de-açúcar na Fazenda Santa Helena, arrendada pela Usina Santa Cruz, localizada no município de Ibaté/SP.

2 AGRICULTURA DE PRECISÃO EM CANA-DE-AÇÚCAR

A lei nº 14.475, de 13 de dezembro de 2022, institui a Política Nacional de Incentivo à Agricultura e Pecuária de Precisão, com o objetivo de ampliar a utilização de técnicas de produção agropecuária no Brasil (Brasil, 2022). Para os efeitos desta lei, define-se a agricultura e pecuária de precisão (APP) como o conjunto de ferramentas e tecnologias aplicadas em um sistema de gerenciamento agropecuário baseado na variabilidade espacial ou individual e temporal que objeti-

va a elevação da eficiência na aplicação de recursos e insumos de produção, de forma a diminuir o desperdício e aumentar a produtividade e a competitividade, bem como garantir a sustentabilidade ambiental, social e econômica (Brasil, 2022).

Em estudo sobre a adoção da AP e seus impactos sobre a eficiência tecnológica em fazendas de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, Carrer et al. (2022) mostraram que o tamanho da propriedade rural, o nível de escolaridade do produtor rural e a assistência técnica no campo afetam a adoção de tecnologias de AP pelos produtores de cana-de-açúcar. Portanto, a Política Nacional de Incentivo à Agricultura e Pecuária de Precisão vem oportunizar de forma igualitária aos pequenos, médios e grandes produtores rurais mais condições para incrementar a produtividade, com redução de custos e melhora na qualidade dos produtos.

De acordo com Grego et al. (2014), a agricultura de precisão (AP) tem como premissa que a variabilidade de espaço e de tempo influencia nos rendimentos da cultura devido às diferenças naturais nas áreas de plantio quanto à fertilidade do solo, infiltração de água, nível de compactação e tipos de solo, e às superfícies geomorfológicas ou outros atributos relevantes. Assim, Pusch, Machado e Amaral (2019) descrevem três estratégias que a AP busca e encontra: 1- a otimização do uso de insumo; 2- o aumento de produtividade do cultivo; e 3- a melhora na qualidade do produto colhido. Os autores (Pusch et al., 2019) citam o Sistema Global de Navegação por Satélite, o sensoriamento (satélites, aviões, vant, drones, sensores), a estratégia de amostragem, o mapeamento da produtividade e o manejo localizado (aplicação localizada nos canaviais a taxas variáveis de fertilizantes químicos ou biofertilizantes on-farm, defensivos agrícolas ou biodefensivos on-farm e outros) como as principais tecnologias envolvidas na AP. Essas tecnologias citadas foram as propulsoras e facilitadoras do uso de ensaios on-farm, que é uma etapa necessária, relativamente recente, dentro do ciclo de AP (Pires; Brandão, 2022).

A cultura da cana-de-açúcar no Brasil foi uma das pioneiras a utilizar tecnologias de ponta, com uso efetivo da AP a partir do ano 2000 (Grego et al., 2014). Conforme a CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento, 2022), a produção de cana-de-açúcar para a safra de 2022-2023 (terceiro levantamento da safra) é de 598,3 milhões de toneladas de cana, produzida em 8.307,3 mil ha de área de colheita. A produtividade nacional estimada é de 72 t/ha, 3,9% superior à obtida na safra de 2021/22. O estado de São Paulo, que é responsável por 49,5% da área colhida nacional, tem índice de colheita mecanizada de 99,2%, o maior do Brasil quando comparado ao índice nacional de colheita mecanizada, que é de 89,7% (Companhia Nacional de Abastecimento, 2022).

A intensificação da mecanização na colheita da cana-de-açúcar por colheitadeiras modernas provocou a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), como resposta à suspensão de queimadas nos canaviais e consequente impedimento da colheita manual. Portanto, a sistematização do manejo nas lavouras (por meio de ensaios on-farm e manejo on-farm), os avanços nos sistemas mecânicos das máquinas agrícolas (colheitadeiras, plantadeiras, pulverizadoras inteligentes, implementos e outros) e novas tecnologias e inovações proporcionadas pela agricultura de precisão (AP) só contribuem para elevação da produtividade das culturas (maior produção em mesmo tamanho de área), redução dos custos e minimização dos impactos negativos ao meio ambiente. Os impactos ao meio ambiente são reduzidos por meio de tecnologias como: manejo integrado de pragas e doenças, uso correto de bionsumos on-farm, aumento da longevidade do solo por práticas conservacionistas, redução do uso de defensivos por manejo localizado com taxa variável e outros.

Para o preparo do solo e plantio da cana-de-açúcar de forma mecanizada, também se faz uso de máquinas agrícolas com sensores eletrônicos acoplados, capazes de identificar a situação do solo. Conforme Sanches et al. (2017), um dos fatores limitantes para um mapeamento preciso dos solos dos canaviais é a quantidade de amostras necessárias para uma caracterização precisa da variabilidade de seus nutrientes, visando o uso correto e adequado de fertilizantes ou biofertilizantes on-farm. Os autores citam que tecnologias atuais de sensores de solo, como os sensores de condutividade elétrica aparente (CEa), são capazes de detectar a variabilidade espacial do terreno (mapas de CEa) em relação às propriedades físicas e/ou químicas do solo com precisão e menor custo. Esses mapas de CEa proporcionam uma robusta ferramenta para a fertilização a taxa variável nos canaviais, com uso eficiente dos insumos.

Quanto ao manejo direcionado a grandes áreas de cana-de-açúcar que podem até possuir características semelhantes de clima, solo, declividade e elevação, mas apresentam manchas diferenciadas de algum desses atributos (elevada variabilidade espacial), Marin et al. (2019) afirmam que pouco se sabe sobre as mudanças na produtividade da cana-de-açúcar e seus componentes (número de colmos e concentração de sacarose) influenciados pelo número de safras dos canaviais (tempo de replantio e número de colheitas de soqueira nos canaviais). E que há declínio no rendimento da produção do canavial com suces-

sivas colheitas em campo, apesar de não se ter uma explicação fisiológica. No entanto, os autores que utilizaram um grande banco de dados on-farm de milhares de talhões espalhados em variadas regiões de clima e solo constataram que o manejo cultural desempenha maior importância na variação do rendimento das colheitas nos diferentes canaviais. E sugerem que esse declínio do rendimento das colheitas é consequência do manejo e não uma característica fisiológica inerente à cultura.

3 ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DA EXPERIMENTAÇÃO ON-FARM EM ÁREA DA USINA SANTA CRUZ EM IBATÉ/SP

Considerando o levantamento exposto sobre o estado da arte da aplicação on-farm em cana-de-açúcar, será relatado como estudo de caso o ensaio on-farm utilizado para validar a agricultura de precisão aplicada na cultura da cana-de-açúcar em área da Fazenda Santa Helena, sendo a experimentação em condições reais do sistema de produção.

A área de estudo compreende um talhão de cana-de-açúcar (cultivar Sweet 9005HP CTC) com aproximadamente 15 ha numa área em Ibaté/SP (Figura 1), arrendada pela Usina Santa Cruz. A experimentação on-farm foi realizada em cana soca no quarto ano de produção considerando duas regiões de zona diferenciada de manejo (ZDM) identificadas conforme Speranza et al. (2019). Foi implantado experimento de adubação para aplicação localizada em cobertura variando as doses dos insumos dentro de cada ZDM considerando as necessidades e manejos da usina. Foram testados tratamentos relacionados à adubação, principalmente de nitrogênio na forma sólida em cobertura e líquida, sendo cinco tratamentos: T1 – testemunha; T2 – adubação sólida 30 kg de N ha^{-1}; T3 – adubação foliar 3 l de fonte de N, B, Zn, Mg ha^{-1}; T4 – adubação foliar 1,5 l de fonte de N, B, Zn, Mg ha^{-1}; T5 – adubação sólida 30 kg de N ha^{-1} e adubação foliar 3 l de fonte de N, B, Zn, Mg ha^{-1}) conforme a Figura 1.

Os tratamentos foram aplicados em faixas de 18 m de largura contemplando 12 linhas da cultura com 650 m de comprimento. Análise química de solo, colheita para a produtividade e medição do teor de brix foram realizadas em cada ZDM e em cada tratamento. Os dados foram submetidos a análise estatística para análise e validação em relação à resposta da planta aos tratamentos. Foi realizada análise estatística ANOVA, com delineamento em blocos casualizados e em faixa no software R, utilizando o teste F de Fisher-Snedecor (Fisher, 1922).

Os resultados da análise estatística indicaram que as duas ZDM não alteraram significativamente os atributos do solo e a produtividade da cana com adubação sólida e foliar nas diferentes doses. Speranza et al. (2019) também não encontraram diferenças entre ZDM considerando a produtividade da cana-de-açú-

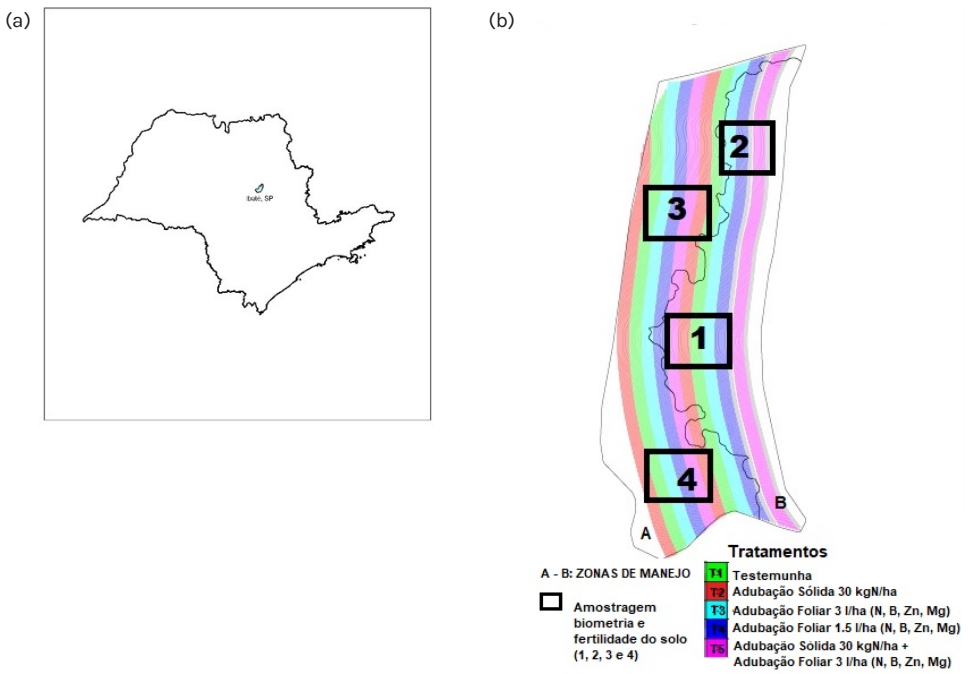


Figura 1. Localização do município e aplicação dos cinco tratamentos em faixas distribuídos em duas posições dentro de cada uma das ZDM (A e B).

Tabela 1. Análise estatística dos tratamentos com adubação na cana-de-açúcar, para os dados da análise química do solo.

Tratamentos	Fósforo	Potássio	Magnésio	Cálcio	pH	Matéria orgânica	SB	CTC	V%
T1	1,096ab	0,61	1,22 a	2,66ab	4,83 ab	24,50 b	4,01 ab	8,18 ab	54,13 ab
T2	1,094b	0,36	1,38 a	3,15 a	5,12 a	27,75 ab	4,90 a	8,08 bc	60,52 a
T3	1,127ab	0,67	1,03 ab	2,37 bc	4,63 b	27,50 a	4,07 ab	9,07 a	43,20 b
T4	1,112ab	0,50	0,78 b	2,11 c	4,53 b	25,75 ab	3,4 b	7,79 bc	43,28 b
T5	1,067 c	0,44	1,24 a	2,67 abc	4,86 ab	24,25 b	4,35 ab	7,15 c	59,9 a
Média	1,097	0,519	1,13	2,62	4,81	25,95	4,26	8,097	52,23
DMS 0,05	1,34	0,44	0,41	0,60	0,43	2,85	1,34	0,95	13,78
CV	0,022	56,23	23,99	15,21	5,90	7,29	20,87	7,79	17,49

DMS: Diferença Mínima Significativa; CV: Coeficiente de Variação; Médias seguidas de letras diferentes, minúsculas, na linha indicam diferença estatística.

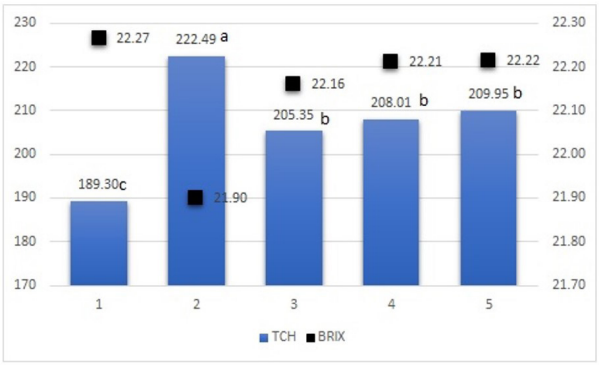


Figura 2. Análise estatística para a produtividade (tha-1) e teor de brix (%) da cana-de-açúcar de acordo com os cinco tratamentos para a cana-de-açúcar.

car, e Bramley et al. (2006) ressaltaram que a experimentação on-farm pode não indicar resultados conclusivos no primeiro ano de ensaio. Na Tabela 1 estão apresentadas as análises estatísticas considerando os tratamentos de aplicações em faixas de insumos e doses nas duas ZDM, para os atributos químicos do solo coletados após colheita. Houve diferença significativa entre os tratamentos para os atributos fósforo, magnésio, cálcio, pH, matéria orgânica, soma de bases, capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%), e o tratamento que resultou em maiores teores dos macronutrientes foi o T2 seguido do T3.

A análise de significância dos cinco tratamentos para produtividade e teor de brix da cana-de-açúcar está apresentada na Figura 2. Verifica-se que houve diferença estatística apenas para a produtividade com maior valor no T2 (adubação na forma sólida com a dose de 30 kg de N ha^{-1}), corroborando os resultados para a química do solo.

Verifica-se que nenhum dos cinco tratamentos resultou em melhorias de produtividade, teor de brix e nem para química do solo. Para os tratamentos com a combinação de adubação foliar e sólida podem ter fornecido um aporte excessivo de nitrogênio para a planta, considerando que o excesso pode não ser absorvido e se perder por lixiviação e volatilização.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentro da agricultura de precisão foram encontrados na literatura diversos ensaios on-farm (ensaios na fazenda), os quais dizem respeito ao uso de novas tecnologias que são pesquisadas, testadas e validadas em campo na área cultivada com cana-de-açúcar. Os estudos levam à detecção de melhores opções de uso das tecnologias testadas para elevar a produtividade da cultura o mais próximo possível de seu máximo potencial produtivo, redução dos custos e minimização dos impactos negativos ao meio ambiente. Além disso, deve-se ressaltar a interação com o produtor, para que as necessidades do mesmo possam ser testadas e validadas diretamente no ambiente produtivo.

Quanto ao estudo de caso, tanto a química do solo quanto a produtividade da cana-de-açúcar foram alteradas apenas entre os tratamentos de adubação e não entre as ZDM. A melhor resposta da produtividade da cana foi para a adubação sólida de 30 kg de N ha-1. Outros ciclos produtivos da cultura devem ser considerados para que a experimentação on-farm possa validar a técnica de agricultura de precisão da cana-de-açúcar para a área de estudo.

AGRADECIMENTOS

À equipe da Usina Santa Cruz, de Ibaté/SP, pelo apoio na condução do trabalho de campo e nas discussões para definição dos tratamentos on-farm.

REFERÊNCIAS

BOCATTI, C. R.; FERREIRA, E.; RIBEIRO, R. A.; CHUEIRE, L. M. de O.; DELAMUTA, J. R. M.; KOBAYASHI, R. K. T.; HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. Microbiological quality analysis of inoculants based on Bradyrhizobium spp. and Azospirillum brasilense produced "on-farm" reveals high contamination with non-target microorganisms. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 53, n. 1, p. 267-280, 2022. DOI: http://doi.org/10.1007/s42770-021-00649-2.

BRAMLEY, R.; COOK, S.; ADAMS, M.; CORNER, R. **Designing your own on-farm experiments:** how PA can help. Barton: Grains Research & Development Corporation – GRDC/CSIRO Land and Water, 2006, 36 p.

BRASIL, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Programa Nacional de Bioinsumos**. Brasília, DF: MAPA, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos/o-programa/conceitos. Acesso em: 23 jan. 2023.

BRASIL. **Lei nº 14.475, de 13 de dezembro de 2022**. Institui a Política Nacional de Incentivo à Agricultura e Pecuária de Precisão para ampliação da eficiência na aplicação de recursos e insumos de produção, de forma a diminuir o desperdício, reduzir os custos de produção e aumentar a produtividade e a lucratividade, bem como garantir a sustentabilidade ambiental, social e econômica. Brasília, DF: Presidência da República, 2022. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14475.htm. Acesso em: 25 jan. 2023.

CARRER, M. J.; SOUZA FILHO, H. M.; VINHOLIS, M. M. B.; MOZAMBANI, C. I. Precision agriculture adoption and technical efficiency: An analysis of sugarcane farms in Brazil. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 177, p. 121510, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121510.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, DF: CONAB, v. 9, safra 2022/23, n. 3, 2022. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana. Acesso em: 25 jan. 2023.

EMBRAPA. **Produção de microrganismos para uso próprio na agricultura (on-farm)**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Disponível em: https://www.embrapa.br/esclarecimentos-oficiais. Acesso em: 23 jan. 2023.

FISHER, R. A. On the mathematical foundations of theoretical statistics. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London: mathematical, physical and engineering sciences**, v. 222, n. 594-604, p. 368-368, 1922. Series A. Disponível em: http://l.academicdirect.org/Horticulture/GAs/Refs/Fisher_1922_Estimation.pdf. Acesso em: 13 jan. 2022.

GREGO, C. R.; RODRIGUES, C. A. G.; VAZ, C. M. P.; HURTADO, S. M. C.; RABELLO, L. M.; BRACALIÃO, S.R.; JORGE, L. A. C.; AFFONSO, R. B. Integração espacial de dados para agricultura de precisão na Unidade Piloto com cana-de-açúcar, Mogi Mirim, SP. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (eds.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2014, v. 1, p. 458-466.

MARIN, F. R.; EDREIRA, J. I. R.; ANDRADE, J.; GRASSINI, P. On-farm sugarcane yield and yield components as influenced by number of harvests. **Field Crops Research**, v. 240, p. 134-142, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.06.011.

PIRES, J. L. F.; BRANDAO, Z. N. **Experimentação on-farm na agricultura de precisão**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2022. 154 p. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1150179/1/Documentos-201-online.pdf Acesso em: 23 jan. 2023.

PUSCH, M.; MACHADO, T. P.; AMARAL, L. R. **Introdução a Agricultura de Precisão**. Campinas: Unicamp, 2019. Disponível em: www.feagri.unicamp.br/gitap. Acesso em: 23 jan. 2023.

SANCHES, G. M.; MAGALHÃES, P. S. G.; FRANCO, H. C. J. Agricultura de Precisão: uma realidade para a cana-de-açúcar? **Revista Canavieiros**, 2017, p. 46-48. Disponível em: https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/precisao/artigos/AGRICULTURA%20DE%20PRECISAO%20UMA%20REALIDADE%20PARA%20A%20CANA-DE-ACUCAR.pdf Acesso em: 23 jan. 2023.

SPERANZA, E. A.; GREGO, C. R.; JORGE, L. A. C.; RODRIGUES, C. A. G.; LUCHIARI JUNIOR, A.; RONQUIM, C. C.; SANCHES, G. M. Delineamento de zonas de manejo em cana-de-açúcar a partir de atributos do solo e da cultura e imagens georreferenciadas. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4., 2019, São Carlos. **Ciência, inovação e mercado: anais.** São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2019.

50

Adoção de práticas e tecnologias de agricultura de precisão por produtores de cana-de-açúcar do estado de São Paulo[1]

Adoption of precision agriculture practices and technologies by sugarcane producers in the state of São Paulo

Carlos Ivan Mozambani[1], Hildo Meirelles de Souza Filho[2], Marcela de Mello Brandão Vinholis[3], Marcelo José Carrer[4]

[1] *Doutor, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos (SP), Brasil, cmozambani@gmail.com*
[2] *Professor, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos (SP), Brasil, hildo@dep.ufscar.br*
[3] *Pesquisadora, Embrapa, São Carlos (SP), Brasil, marcela.vinholis@embrapa.br*
[4] *Professor, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos (SP), Brasil, marcelocarrer@dep.ufscar.br*

RESUMO

Este capítulo objetiva identificar as práticas e tecnologias de agricultura de precisão adotadas por fornecedores independentes de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, bem como os fatores que diferenciam os adotantes dos não adotantes e as barreiras à adoção. Para alcançar estes objetivos, foi realizado um levantamento de dados primários por meio da aplicação de questionário estruturado junto a uma amostra de 131 fornecedores de cana-de-açúcar. Seis práticas e tecnologias foram adotadas por esses produtores: sistematização do plantio com auxílio de GNSS e imagens; colheita com piloto automático; análise de solo georreferenciada; levantamento de pragas e doenças por meio de imagens; aplicação de fertilizantes e corretivos à taxa variada, e aplicação de defensivos à taxa variada. Na maioria dos casos, foi possível observar que os produtores adotantes recebem suporte de agentes prestadores de serviços, como, por exemplo, as usinas de açúcar e álcool, as cooperativas agropecuárias e as consultorias particulares. Esse suporte é importante para auxiliar o produtor no gerenciamento das tecnologias. A decisão de adoção do produtor foi influenciada por: acesso a fontes de informação agropecuária relevantes; escolaridade; área da fazenda; intensidade no uso prévio de outras tecnologias; acesso ao crédito; dependência da renda da cana-de-açúcar, e percepção *ex ante* dos benefícios das tecnologias de AP. Os produtores que não adotaram as tecnologias reportaram o elevado investimento inicial, a pequena escala de produção e a ausência ou pouca informação sobre a tecnologia como barreiras mais comuns à adoção.

Palavras-chave: adoção de tecnologia; agricultura de precisão; barreiras à adoção; cana-de-açúcar.

ABSTRACT

This chapter aims at identifying the precision agriculture practices and technologies adopted by sugarcane suppliers in the State of São Paulo, as well as the factors that differentiate adopters from non-adopters and barriers to adoption. In order to achieve these objectives, primary data was collected by applying a structured questionnaire to a sample of 131 sugar cane suppliers.. Six practices and technologies were adopted by these producers: planting systematisation with the aid of GNSS and images; harvesting with autopilot; georeferenced soil analysis; pest and disease surveys using images; application of fertilisers and correctives at a varied rate; and application of pesticides at a varied rate. In most cases, it was observed that adopting producers received support from service providers, such as sugar and alcohol mills, agricultural cooperatives and private consultancies. This support is important to assist the producer in managing the technologies. The producer's decision to adopt was influenced by the access to relevant agricultural information sources, education level, farm area, intensity of previous adoption of complementary technologies, access to credit, dependence on sugarcane income and ex-ante perception of benefits of precision agriculture technologies. Producers who did not adopt the technologies reported high initial investment, small-scale production and the absence or few information about the technology as the most common barriers to adoption.

Keywords: technology adoption; precision agriculture; barriers to adoption; sugarcane.

[1] Os resultados apresentados neste capítulo são detalhados em Mozambani et al. (2021).

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000023

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão (AP) é uma estratégia de gerenciamento agropecuário que reúne, processa e analisa dados temporais e espaciais da lavoura, e os combina com outras informações para apoiar as tomadas de decisões do produtor. A AP tem como objetivo melhorar a eficiência no uso de recursos e o aumento da produtividade, qualidade, rentabilidade e sustentabilidade da produção agrícola (International Society of Precision Agriculture, 2020). Para isso, um conjunto de "tecnologias de agricultura de precisão" (TAPs) são usadas isoladamente ou combinadas nas operações agrícolas, tanto *hardwares* e *softwares*, a exemplo de técnicas de coleta de dados por sensores, mapeamentos, amostragens georreferenciadas, sistemas de informações geográficas e máquinas e equipamentos de aplicação a taxa variada (Barnes et al., 2019).

Nos Estados Unidos (EUA), Canadá e países europeus, há evidências empíricas que mostram o aumento da difusão de TAPs entre produtores rurais (Erickson; Widmar, 2015; European Parliamentary Research Service, 2016). No Brasil, não há informações relacionadas à difusão de TAPs em bases de dados oficiais. Existem, no entanto, estudos empíricos que apresentam a evolução da adoção de TAPs na agricultura (Antolini, 2015; Bolfe et al., 2020), especialmente entre produtores de soja e milho (Bernardi; Inamasu, 2014), e usinas de açúcar e álcool do estado de São Paulo (Silva et al., 2011). No processo de adoção de TAPs, há diferentes graus de adoção. Há produtores que adotam apenas tecnologias embarcadas em equipamentos automatizados (piloto automático e GNSS, por exemplo), enquanto outros adotam um pacote mais completo de TAPs (Isgin et al., 2008; Barnes et al. 2019).

Estudos mostram que um conjunto de fatores influencia a decisão dos produtores em adotar TAPs. Dentre estes, há as características socioeconômicas do produtor, a exemplo de idade, escolaridade e renda (Watcharaanantapong et al., 2013), suas fontes de informações (Larson et al., 2008), suas avaliações subjetivas quanto a lucratividade, produtividade e sustentabilidade ambiental da inovação (Allahyari et al., 2016), ou ainda as características da propriedade rural, como tamanho e localização (Walton et al., 2010).

A difusão de TAPs no cultivo da cana-de-açúcar no Brasil tem crescido, mas sua aplicação ainda é incipiente, principalmente quando considerados os produtores fornecedores de cana (Mozambani, 2021). Com a adoção de TAPs, seria possível obter respostas cada vez mais rápidas e precisas para enfrentar os desafios de expansão e modernização tecnológica do setor canavieiro (Amarasingam et al., 2022).

Nesse contexto, o presente capítulo propõe-se a responder às seguintes questões de investigação: i) Quais são as TAPs adotadas pelos fornecedores de cana-de-açúcar no estado de São Paulo? ii) Quais são as principais barreiras à adoção de TAPs? iii) Quais são os principais agentes envolvidos na prestação de serviços de TAPs? e iv) Qual o perfil dos adotantes de TAPs?

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho desenvolveu-se em três etapas: a revisão de literatura e entrevistas com agentes-chave, a coleta de dados e a análise dos dados. A revisão da literatura científica identificou os fatores que poderiam explicar a adoção de TAPs. As entrevistas com agentes da cadeia de produção da cana-de-açúcar aprofundaram o entendimento sobre o estado da arte em relação a AP e contribuíram para a elaboração do questionário estruturado. Segundo a Organização de Associações de Produtores de Cana do Brasil (Organização de Associações de Produtores de Cana do Brasil, 2019), a produção de cana é segmentada em dois perfis: cana própria da indústria, o que inclui a produção em áreas próprias, áreas arrendadas e em parceria[2], e a produção realizada por produtores que cultivam a cana-de-açúcar em terras próprias ou de terceiros, e fornecem para as indústrias, sendo comumente chamados de fornecedores de cana. Neste sentido, o questionário estruturado foi aplicado presencialmente junto a uma amostra de 131 produtores rurais fornecedores de cana para a indústria, distribuídos em 47 municípios do estado de São Paulo (Figura 1).

O questionário contemplou questões sobre a adoção de TAPs e as características dos produtores, da propriedade rural e do sistema de produção na safra 2018/2019. A seleção da amostra contou com o apoio da Cooperativa de Plantadores de Cana do Estado de São Paulo (COPLACANA).

Identificaram-se seis TAPs adotadas pelos produtores, conforme apresentado na Figura 2. O produtor rural pode tanto adotar uma tecnologia de modo isolado, como também um conjunto de TAPs de forma combinada (Isgin et al., 2008; Barnes et al., 2019). Assim, a intensidade de adoção de TAPs pode variar entre os produtores. Neste capítulo, os produtores que adotaram pelo menos uma das seis TAPs foram classificados como adotantes, os quais corresponde-

[2] Parceiros são pessoas físicas ou jurídicas, proprietários de imóveis rurais, que cedem suas propriedades rurais através de contrato de parcerias para terceiros, para o cultivo da cana-de-açúcar. Os terceiros podem ser produtores de cana ou as próprias indústrias (ORPLANA, 2019).

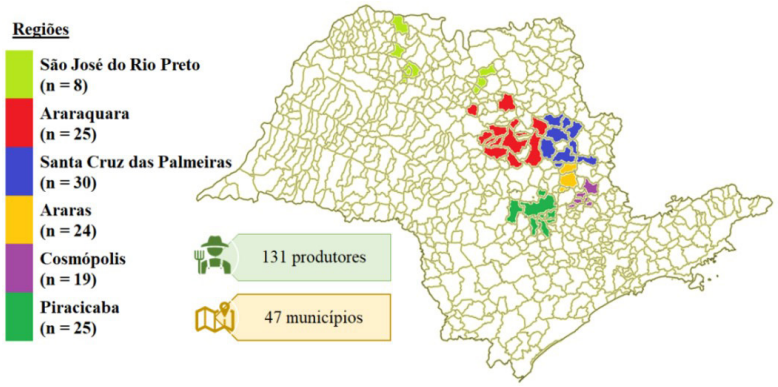


Figura 1. Mapa do estado de São Paulo com os municípios amostrados.

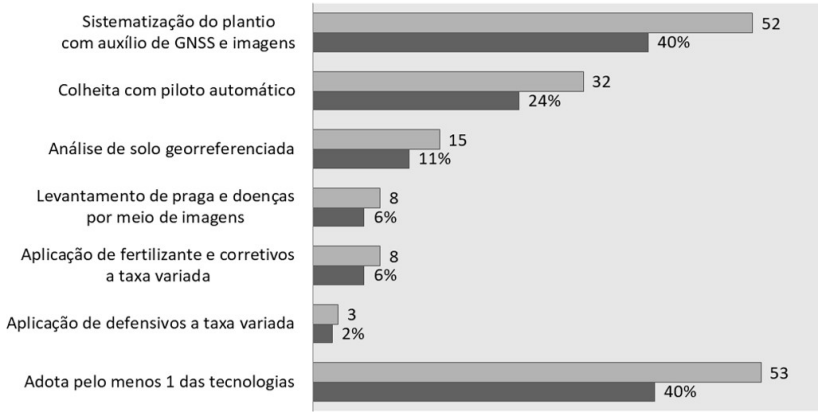


Figura 2. Frequência de adoção de TAPs entre 131 produtores fornecedores de cana no estado de São Paulo.

ram a 40% da amostra (53 adotantes). O grupo dos não adotantes de TAPs corresponde a 78 produtores.

Os dados obtidos desses dois grupos foram analisados por meio de estatística descritiva (médias e frequências) e testes de hipótese. Os dois grupos amostrais, adotantes e não adotantes de TAPs, foram comparados quanto às fontes de informação agropecuária utilizadas; ao nível de escolaridade dos produtores; à experiência; ao tamanho da propriedade; ao acesso a crédito; à dependência da renda da cana-de-açúcar; à percepção em relação às TAPs, e ao nível tecnológico.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta uma análise da evolução da adoção das TAPs pelos produtores da amostra ao longo do tempo. Percebe-se que a sistematização do plantio com auxílio do GNSS e imagens foi a primeira tecnologia a ser adotada no grupo amostral dos adotantes de TAPs, o que ocorreu em 2010. Em 2013, iniciou-se a adoção da análise de solo georreferenciada, seguida da aplicação de fertilizantes ou defensivos a taxa variada, em 2014. Por fim, o levantamento de pragas e doenças com o auxílio de imagens aconteceu a partir de 2017, na amostra de produtores analisados.

O uso das TAPs pelos produtores ocorre, na maioria dos casos, com o suporte de agentes prestadores de serviços. A Figura 4 mostra que, em mais da metade dos casos, a coleta (52% dos adotantes) e a análise dos dados (58% dos adotantes) para a sistematização do plantio por produtores rurais fornecedores de cana são feitas pela usina de açúcar e álcool.

Ainda na Figura 4, é possível observar que a análise de solo georreferenciada, tanto na coleta como na análise dos dados, é realizada com o apoio de prestadores de serviços especializados (67% e 71% dos adotantes, respectivamente) e cooperativas agropecuárias (33% e 29% dos casos, respectivamente). A coleta e a análise dos dados para o levantamento de pragas e doenças por meio de imagens são realizadas por prestadores de serviços especializados (33% e 34%, respectivamente), cooperativa agropecuária (22% e 33%, respectivamente), o próprio produtor rural (34% e 22%, respectivamente) e, em menor proporção, por usinas (11% dos adotantes, tanto para a coleta como a análise dos dados).

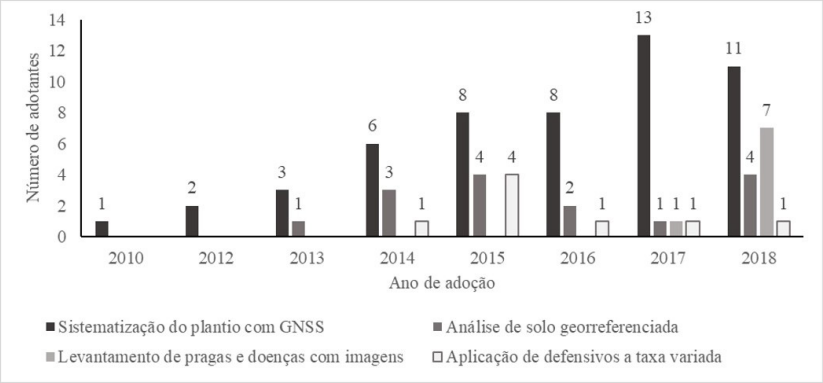


Figura 3. Evolução da adoção de TAPs no grupo de 53 adotantes.

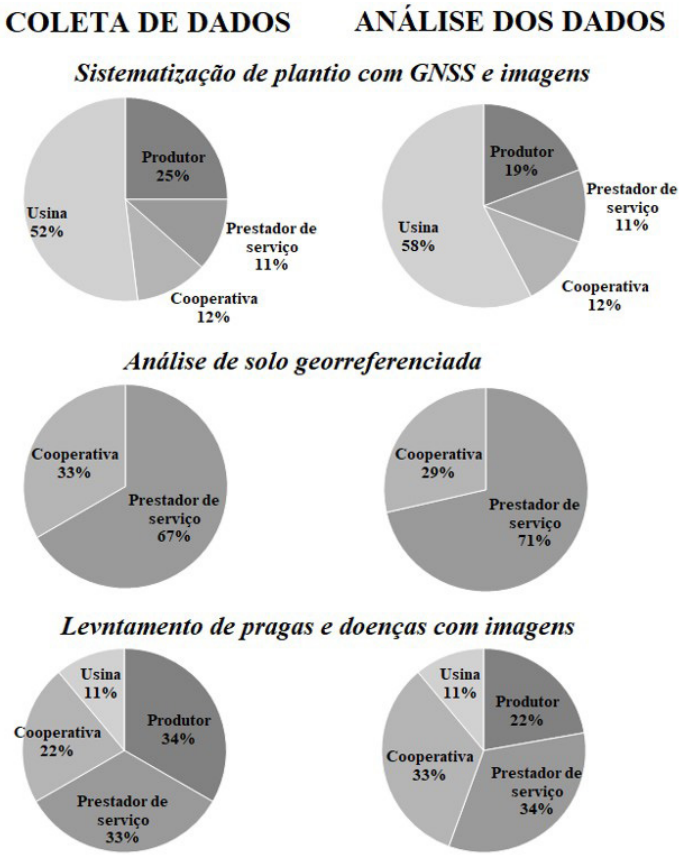


Figura 4. Agentes envolvidos nos serviços prestados com TAPs para produtores fornecedores de cana.

O aproveitamento das funcionalidades das TAPs apresenta alguns desafios. Dificuldades com conectividade no campo, incluindo o sinal RTK, a falta de assistência técnica do fornecedor ou a demora no atendimento, a dificuldade em encontrar mão de obra capacitada para operar os equipamentos e a incompatibilidade entre sistemas computacionais de diferentes marcas de máquinas e equipamentos agrícolas são os principais obstáculos mencionados pelos adotantes de TAPs (Tabela 1).

A Tabela 2 mostra que, dentre os não adotantes, existem algumas barreiras comuns à adoção de qualquer uma das TAPs, como o elevado investimento inicial, a pequena escala de produção e a ausência ou pouca informação sobre a tecnologia. Para a adoção de sistematização de plantio com auxílio do GNSS e imagens, e a aplicação de fertilizantes ou defensivos a taxa variada, a falta de máquinas e equipamentos que comportem essas tecnologias é uma barreira à adoção. Já a crença do produtor de que ele conhece mui-

to bem as características de sua área de produção é um fator limitante para a adoção da análise de solo georreferenciada e o levantamento de pragas e doenças por meio de imagens.

Com o objetivo de identificar as características que diferenciam os grupos adotantes de TAPs (n=53) e não adotantes (n=78), foram calculadas estatísticas descritivas e realizados testes de hipóteses para variáveis relacionadas: (i) às fontes de informação agropecuária utilizadas pelos produtores rurais; (ii) ao capital humano; (iii) à escala de produção; (iv) ao nível tecnológico do sistema de produção de cana-de-açúcar; (v) aos recursos financeiros, e (vi) à percepção do produtor rural em relação às TAPs. Os resultados das análises estatísticas são apresentados na Tabela 3.

A proporção de produtores rurais que usam, como fontes relevantes de informação agropecuária, os consultores técnicos particulares, os fornecedores de máquinas e equipamentos, e os compradores de cana (usinas) difere estatisticamente os dois grupos amostrais. Essas três fontes foram mais consultadas por produtores que adotaram TAPs do que por produtores que não adotaram. Em geral, os adotantes dependem de fontes de informação especializadas e que forneçam orientação técnica específica no tema da TAP (Daberkow; McBride, 2003). Este resultado corrobora outros estudos empíricos sobre a adoção de TAPs em diferentes países (Walton et al., 2008; Barnes et al., 2019). Os agentes associados a essas fontes de informação (consultores, fornecedores de máquinas e insumos, e compradores de cana) desempenham papel relevante na promoção e incentivo à adoção de TAPs. Adicionalmente, os produtores rurais têm acesso às informações relacionadas às novas tecnologias em eventos agropecuários, como palestras, dias de campo e feiras agropecuárias (Larson et al., 2008). A interação e a troca de informações com os pares proporcionadas nesses eventos auxiliam o produtor na tomada de decisão e contribuem para minimizar o risco percebido associado à adoção de novas tecnologias. Observa-se na Tabela 3 que, em média, o adotante de TAPs participa de 3,5 eventos agropecuários ao ano a mais do que o produtor não adotante.

Com relação ao capital humano, identificou-se maior proporção de produtores adotantes de TAPs com Ensino Superior completo (49%) do que de pro-

Tabela 1. Pontos de atenção no processo de adoção de TAPs.

Dificuldade na fase de adoção da TAP	% entre adotantes
Problema com conectividade no campo	25%
Falta de assistência técnica do fornecedor	19%
Encontrar mão de obra capacitada	15%
Dificuldade de comunicação entre sistemas de equipamentos agrícolas	15%

Tabela 2. Fatores limitantes a adoção de TAPs.

Motivos para a não adoção (% de respostas entre os 78 produtores de cana não adotantes)	Sistematização do plantio	Amostra de solo georreferenciada	Levantamento de pragas e doenças com imagens	Aplicação de fertilizantes e defensivos a taxa variada
Custo elevado para adotar	69%	53%	48%	43%
Escala de produção pequena para adotar	32%	21%	17%	15%
Não conhece ou tem pouca informação sobre a tecnologia	9%	13%	13%	7%
Não gosta de tentar novas tecnologias	10%	12%	17%	11%
Não tem máquinas e equipamentos que comportem o uso da tecnologia	9%	-	-	21%
Acredita que já conhece bem a área de produção	-	13%	23%	-
Mão de obra pouco qualificada	4%	-	-	-
Topografia dificulta a adoção	10%	-	-	-
Acesso a internet	1%	-	-	-
Prioridade é fazer o básico	-	4%	-	-
Não realiza aplicação de corretivo ou fertilizante a taxa variada	-	19%	-	-
Demora para sair o resultado da análise	-	4%	-	-

Tabela 3. Perfil de adotantes e não adotantes de TAPs.

	Estatística	Adotante (n=53)	Não adotante (n=78)	Total	Teste Hipótese[1]
Fontes de informação agropecuária					
Consultor particular	%	26,42	6,41	14,5	***
Forncedor de insumos	%	58,49	37,18	45,8	**
Usina de açúcar e álcool	%	66,04	44,87	53,44	**
Número de eventos agropecuários/ano	Média	11,51	7,98	9,4	**
Capital humano					
Escolaridade (Ensino Superior completo)	%	49,06	23,08	33,59	***
Experiência anterior com TAPs	%	15,09	5,13	9,16	*
Escala de produção					
Área com cana-de-açúcar (hectare)	Média	1125,46	278,72	621,29	***
Nível tecnológico (adoção de outras tecnologias/práticas agropecuárias)					
Software para suporte na gestão	%	66,04	16,67	36,64	***
Rotação com leguminosa	%	54,72	30,77	40,46	***
Mudas sadias ou mudas pré-brotadas (MPB)	%	73,58	38,46	52,67	***
Variedade adaptada	%	94,34	75,64	83,21	***
Análise de solo anual ou a cada dois anos	%	75,47	58,97	65,65	*
Cuidado com pisoteio (bitola adequada ao espaçamento)	%	75,47	58,97	65,65	*
Recursos financeiros					
Acesso ao crédito nos últimos três anos	%	73,58	58,97	64,89	*
Dependência da atividade com cana (porcentagem da área com cana em relação à área total)	Média	0,8617	0,7467	0,7933	**
Comportamento (percepção do produtor em relação às TAPs)					
Aumentam a produtividade da lavoura de cana[2]	%	86,8	71,8	77,8	***
Aumentam os custos de produção[3]	%	64,2	85,9	64,1	**

[1]Para os testes de hipótese, foram utilizados os testes t-student para comparação entre media e Qui-quadrado (x^2) para comparação entre proporções. Asterisco (*) indica que a diferença entre os grupos adotantes e não adotantes é significante estatisticamente, no nível: *p≤0,10; **p≤0,05, e ***p≤0,01; [2]Variável binária, recebe 1 se o produtor indicou que sua percepção é de aumentar a produtividade antes da adoção (adotante) ou caso adote TAPs (não adotante); 0 caso contrário; [3]Variável binária, recebe 1 se o produtor indicou que sua percepção é de aumentar o custo de produção antes da adoção (adotante) ou caso adote TAPs (não adotante); 0 caso contrário.

dutores não adotantes (23%). Essa diferença de frequências apresentou significância estatística no nível de 1%. Este resultado corrobora a relação positiva entre o grau de escolaridade e a adoção de TAPs encontrada em outros estudos (Paxton et al., 2011; Watcharaanantapong et al., 2013). O grau de escolaridade mais alto está associado com a habilidade e a capacidade do produtor em adquirir e processar informações, tomar decisões e adquirir novas tecnologias (Khanal et al., 2019).

Além do ensino formal, a experiência do produtor rural é um fator que influencia a adoção de tecnologias agropecuárias. Nas entrevistas de campo, o produtor foi questionado se havia exercido alguma atividade profissional relacionada com TAPs fora da propriedade rural, como, por exemplo: ter trabalhado em usina de cana e ter tido contato com estas tecnologias, ou ter trabalhado em alguma cooperativa ou algum distribuidor de insumos agrícolas que prestava serviços e/ou revendia equipamentos relacionados às TAPs. Os dados revelam que 15% dos adotantes indicaram ter experiência prévia em atividades relacionadas às TAPs, enquanto que apenas 5% dos não adotantes reportaram alguma experiência ante-

rior. Para Cohen e Levinthal (1990), o conhecimento prévio confere ao indivíduo a capacidade de reconhecer o valor de novas informações, assimilá-las e aplicá-las. A perspectiva é que produtores que possuem conhecimento prévio sobre a tecnologia de interesse têm mais facilidade de avaliar seus benefícios e, possivelmente, estarão mais dispostos a adotá-las (Alsos et al., 2003). Zahra e George (2002) destacam que o conhecimento é cumulativo, o desempenho do aprendizado é maior e o custo marginal de aprendizagem é menor, quando o objeto do aprendizado está relacionado com o que já se conhece.

A escala de produção, medida pela área plantada com cana-de-açúcar, é outra variável que diferencia estatisticamente os dois grupos amostrais no nível de significância de 1%. Produtores adotantes de TAPs operam com áreas de produção maiores. Este é um indicativo de possíveis efeitos de economias de escala na adoção de TAPs. A escala de produção, mensurada pelo tamanho da propriedade, está associada a maior flexibilidade para testar novas tecnologias, maior facilidade de acesso ao crédito rural e maior capacidade de absorver os riscos relacionados ao investimento de uma nova tecnologia (Walton et al., 2010). Para Feder e Umali (1993), quando se trata de tecnologias não divisíveis, pode haver um limite crítico no tamanho das propriedades, de forma que propriedades que não atinjam esse tamanho crítico encontram dificuldade para adotar a nova tecnologia. Ainda com relação ao sistema de produção, observa-se que os adotantes de TAPs apresentam um nível tecnológico superior. Este grupo adota proporcionalmente um conjunto maior de outras tecnologias e práticas agropecuárias complementares voltadas para a gestão e ganhos de produtividade, como, por exemplo, *softwares* para suporte na gestão, rotação de culturas, mudas pré-brotadas, variedades adaptadas, etc.

A disponibilidade e o acesso a fontes de recursos financeiros constituem outro fator de influência na decisão de adoção de tecnologias agropecuárias. Os resultados sugerem que os adotantes de TAPs são mais dependentes economicamente da renda da produção de cana, uma vez que, na média, esse grupo tem maior proporção da área total produtiva com cana-de-açúcar, perfazendo 86% da área com cana, enquanto que o grupo de não adotantes tem 75% da área com cana. Ainda, uma proporção maior de produtores rurais deste grupo acessou crédito rural nos três anos anteriores à entrevista (74% dos adotantes contra 59% de não adotantes). A política de crédito rural é um importante instrumento de fomento à adoção de inovações na agricultura (Carrer et al., 2020).

As variáveis relacionadas ao comportamento do produtor medem a percepção dos produtores *ex ante* a adoção das TAPs. Uma proporção maior de produtores adotantes de TAPs (87%) acreditava antes da adoção que a inovação poderia aumentar a produtividade da área com cana, enquanto que, para os não adotantes, esse percentual é menor (72%). Com relação ao efeito da adoção no custo de produção, 64% dos adotantes acreditavam antes da adoção que a inovação poderia aumentar o custo de produção, já 86% dos não adotantes têm essa percepção. Estes resultados corroboram os achados de outros estudos (Barnes et al., 2019).

4 CONCLUSÕES

Os resultados reportados neste capítulo sugerem que a principal TAP adotada pelos produtores de cana-de-açúcar no estado de São Paulo é a sistematização do plantio com auxílio de GNSS e imagens, seguida da colheita com piloto automático. Em menor proporção, há a adoção da análise de solo georreferenciada, o levantamento de pragas e doenças com o auxílio de imagens, e a aplicação de fertilizantes e defensivos a taxa variada. A usina foi o principal agente responsável por auxiliar os produtores na adoção da sistematização do plantio, enquanto que os prestadores de serviços especializados e as cooperativas auxiliaram na adoção da análise de solo georreferenciada e do levantamento de pragas e doenças por imagens.

Na fase de adoção de TAPs, os principais gargalos são: a conectividade no campo, a falta de assistência técnica de fornecedores de equipamentos, a falta de mão de obra capacitada e a incompatibilidade da interface de comunicação entre sistemas computacionais de equipamentos agrícolas. Dentre os não adotantes, a principal barreira encontrada para a adoção foi o elevado investimento inicial.

Dentre as características que diferenciam os adotantes de TAPs dos não adotantes, estão: (i) maior acesso a fontes de informação especializadas, como o consultor técnico particular, o fornecedor de máquinas e equipamentos agrícolas, e o comprador da cana (usina); (ii) maior participação em eventos agropecuários, como palestras, feiras agropecuárias e dias de campo; (iii) maior grau de escolaridade e experiência anterior com conhecimento associado às TAPs; (iv) maiores áreas de produção de cana; (v) maior dependência econômica da cana e maior acesso ao crédito; (vi) nível tecnológico mais avançado no sistema de produção, e (vii) percepção positiva de que a inovação poderia trazer ganhos de produtividade.

REFERÊNCIAS

ALLAHYARI, M. S.; MOHAMMADZADEH, M.; NASTIS, S. A. Agricultural experts' attitude towards precision agriculture: evidence from Guilan Agricultural Organization, Northern Iran. **Information Processing in Agriculture**, v. 3, n. 3, p. 183-189, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.07.001.

ALSOS, G. A.; LJUNGGREN, E.; PETTERSEN, L. T. Farm-based entrepreneurs: what triggers the start-up of new business activities? **Journal of Small Business and Enterprise Development**, v. 10, n. 4, p. 435-443, 2003. DOI: http://doi.org/10.1108/14626000310504747.

AMARASINGAM, N.; SALGADOE, A. S. A.; POWELL, K.; GONZALEZ, L. F.; NATARAJAN, S. A review of UAV platforms, sensors, and applications for monitoring of sugarcane crops. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 26, p. 100712, 2022.

ANTOLINI, L. S. **Condicionantes da adoção de agricultura de precisão por produtores de grãos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Administração de Organizações) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2015.

BARNES, A. P.; SOTO, I.; EORY, V.; BECK, B.; BALAFOUTIS, A.; SÁNCHEZ, B.; VANGEYTE, J.; FOUTANAS, S.; VAN DER WAL, T.; GÓMEZ-BARBERO, M. Influencing factors and incentives on the intention to adoption precision agricultural technologies within arable farming systems. **Environmental Science & Policy**, v. 93, p. 66-74, 2019. http://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.12.014.

BERNARDI, A. C. C.; INAMASU, R. Y. Adoção da Agricultura de Precisão no Brasil. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (eds.). **Agricultura de Precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 559-577.

BOLFE, E. L.; JORGE, L. A. C.; SANCHES, I.; COSTA, C. C.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; VICTÓRIA, D.; INAMASU, R.; GREGO, C.; FERREIRA, V.; RAMIREZ, A. **Agricultura digital no Brasil: tendências, desafios e oportunidades: resultados de pesquisa online**. Campinas: Embrapa, 2020. 44 p. Disponível em: https://www.embrapa.br/agropensa/produtos-agropensa. Acesso em: 17 set 2022.

CARRER, M. J.; MAIA, A. G.; VINHOLIS, M. M. B.; SOUZA FILHO, H. M. Assessing the effectiveness of rural credit policy on the adoption of integrated crop-livestock systems in Brazil. **Land Use Policy**, v. 92, 104468, 2020.

COHEN, W.; LEVINTHAL, D. Absorptive capacity: a new perspective on learning and innovation. **Administrative Science Quarterly**, v. 35, n. 1, p. 128-152, 1990. DOI: http://doi.org/10.2307/2393553.

DABERKOW, S. G.; MCBRIDE, W. D. Farm and operator characteristics affecting the awareness and adoption of precision agriculture technologies in the US. **Precision Agriculture**, v. 4, n. 2, p. 163-177, 2003. DOI: http://doi.org/10.1023/A:1024557205871.

ERICKSON, B.; WIDMAR, D. A. **Precision agricultural services dealership survey results:** sponsored by croplife magazine and the center for food and agricultural business. West Lafayette: Purdue University, 2015.

EUROPEAN PARLIAMENTARY RESEARCH SERVICE. **Precision agriculture and the future of farming in Europe**. Bruxelas: EU/Scientific Foresight Study/Science and Technology Options Assessment (STOA), 2016. DOI: http://doi.org/10.2861/020809.

FEDER, G.; UMALI, D. The adoption of agricultural innovations: a review. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 43, n. 3-4, p. 215-239, 1993. DOI: http://doi.org/10.1016/0040-1625(93)90053-A.

INTERNATIONAL SOCIETY OF PRECISION AGRICULTURE, 2020. Disponível em: https://www.ispag.org/. Acesso em: 17 set 2022.

ISGIN, T.; BILGIC, A.; FOSTER, D. L.; BATTE, M. T. Using count data models to determine the factors affecting farmer's quantity decisions of precision farming technology adoption. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 62, n. 2, p. 231-242, 2008. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2008.01.004.

KHANAL, A. R.; MISHRA, A. K.; LAMBERT, D. M.; PADUEL, K. P. Modeling post adoption decision in precision agriculture: a Bayesian approach. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, p. 466-474, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.025.

LARSON, J. A.; ROBERTS, R. K.; ENGLISH, B. C.; LARKIN, S. L.; MARRA, M. C.; MARTIN, S. W.; PAXTON, K. W.; REEVES, J. M. Factors affecting farmer adoption of remotely sensed imagery for precision management in cotton production. **Precision Agriculture**, v. 9, n. 4, p. 195-208, 2008. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-008-9065-1.

MOZAMBANI, C. I; SOUZA FILHO, H. M.; VINHOLIS, M. M. B.; CARRER, M. J. **Adoção da agricultura de precisão por produtores de cana-de-açúcar fornecedores para indústria no estado de São Paulo**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2021. 21 p.

ORGANIZAÇÃO DE ASSOCIAÇÕES DE PRODUTORES DE CANA DO BRASIL. **Perfil segmentado do produtor de cana**: safra 2018/2019. Ribeirão Preto: ORPLANA, 2020. Disponível em: http://www.orplana.com.br/prog-segmenta. Acesso em: 09 dez. 2020.

PAXTON, K. W.; MISHRA, A. K.; CHINTAWAR, S.; ROBERTS, R. K.; LARSON, J. A.; ENGLISH, B. C.; LAMBERT, D. M.; MARRA, M. C.; LARKIN, S. L.; REEVES, J. L.; MARTIN, S. W. Intensity of precision agriculture technology adoption by cotton producers. **Agricultural and Resource Economics Review**, v. 40, n. 1, p. 133-144, 2011. DOI: http://doi.org/10.1017/S1068280500004561.

SILVA, C. B.; MORAES, M. A. F. D.; MOLIN, J. P. Adoption and use of precision agriculture technologies in the sugarcane industry of São Paulo state, Brazil. **Precision**

Agriculture, v. 12, n. 1, p. 67-81, 2011. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-009-9155-8.

WALTON, J. C. LAMBERT, D. M.; ROBERTS, R. K.; LARSON, J. A.; ENGLISH, B. C.; LARKIN, S. L.; MARTIN, S. W.; MARRA, M. C.; PAXTON, K. W.; REEVES, J. M. Adoption and abandonment of precision soil sampling in cotton production. **Journal of Agricultural and Resource Economics**, v. 33, n. 3, p. 428-448, 2008.

WALTON, J. C.; LARSON, J. A.; ROBERTS, R. K.; LAMBERT, D. M.; ENGLISH, B. C.; LARKIN, S. L.; MARRA, M. C; MARTIN, S. W.; PAXTON, K. W.; REEVES, J. M. Factors influencing farmer adoption of portable computers for site-specific management: A case study for cotton production. **Journal of Agricultural and Applied Economics**, v. 42, n. 2, p. 193-209, 2010. DOI: http://doi.org/10.1017/S1074070800003400.

WATCHARAANANTAPONG, P; ROBERTS, R. K.; LAMBERT, D. M.; LARSON, J. A.; VALENDIA, M.; ENGLISH, B. C.; REJEUS, R. M.; WANG, C. Timing of precision agriculture technology adoption in US cotton production. **Precision Agriculture**, v. 15, n. 4, p. 427-446, 2013. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-013-9338-1.

ZAHRA, S. A.; GEORGE, G. Absorptive capacity: a review, reconceptualization, and extension. **Academy of Management Review**, v. 27, n. 2, p. 185-203, 2002. DOI: http://doi.org/10.2307/4134351.

51

Sistema de informação geográfica para mapeamento da qualidade de maçã APPLESHOW

Geographic information system for apple quality mapping "APPLESHOW"

Luciano Gebler[1], Diego Rodrigo Longo[2], Claudio Leones Bazzi[3]

[1] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br*
[2] *Empresário, Sysgeo Sistemas e Consultoria, Missal (PR), Brasil, diegorodrigolongo@gmail.com*
[3] *Professor/Pesquisador, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira (PR), Brasil, bazzi@utfpr.edu.br*

RESUMO

O crescimento da necessidade de alimentos, a escassez de água, a maior preocupação com o ambiente e a busca pelo aumento da lucratividade são fatores que têm estimulado a adoção de técnicas otimizadas de manejo e gestão no contexto agrícola. Neste sentido, tecnologias relacionadas à agricultura de precisão (AP) fizeram com que surgissem sistemas voltados ao apoio nas tomadas de decisão, sendo que o primeiro passo é o ordenamento das informações de forma clara, visível e compreensível a todos os interessados. O *software* APPLESHOW tem a capacidade de mapear as áreas a serem analisadas, adicionar camadas de informação com base em pontos coletados e interpolá-las, apresentando-as e classificando-as em forma de mapas, contando ainda com a possibilidade de usar as imagens de outros programas de imagens aéreas como mapa base, tornando mais fácil o reconhecimento e a interpretação das informações.

Palavras-chave: fruticultura de precisão; gestão agrícola; GIS; mapa de colheita.

ABSTRACT

Growing environmental awareness, water scarcity and food production requirements,, in addition to the search for greater profitability, are factors that have stimulated the adoption of optimized management and management techniques in agriculture. In this context, technologies related to precision agriculture (PA) have given rise to systems aimed at informing decision-making, with the first step being the presentation of clear, legible and comprehensible information for all interested stakeholders. The "Apple Show" software can map areas for analysis, add layers of information based on collected data points and interpolate them, presenting and classifying them in the form of maps, with the possibility of using images from other aerial imagery programs as a basemap, making it easier to recognize and interpret the information.

Keywords: precision fruit growing; agricultural mapping; GIS; harvest map.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000024

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico tem sido fundamental no contexto agrícola e não está somente relacionado à invenção de novas máquinas ou equipamentos, mas também à evolução dos processos de produção, sendo a produtividade geralmente empregada na mensuração do progresso e da eficiência na produção (Gonzalez; Costa, 1998). No intuito de manter-se competitivo, busca-se de forma constante o atendimento às exigências do consumidor, produzindo alimentos de boa qualidade.

A fruticultura tem se tornado um dos mais importantes segmentos do agronegócio brasileiro, considerando que aspectos relativos à alta rentabilidade e à expressiva utilização de mão de obra contribuem significativamente para o desenvolvimento econômico e social do País, e é uma alternativa para o avanço das exportações brasileiras de frutas, que gira em torno de 300 mil toneladas anuais (Kist, 2018).

Neste contexto, considerando o aspecto econômico, a organização das informações disponíveis e a viável interferência de manejo atrelada ao cultivo de algumas frutas, foi necessário o desenvolvimento de um aplicativo que permitisse realizar a transformação de dados quantitativos e qualitativos – na qual se possa observar a variabilidade temporal e espacial, o sentido da ocorrência e a localização de determinadas características, como, por exemplo, o diâmetro do fruto, o teor de sólidos solúveis, os índices de cor, os processos fisiológicos, a ocorrência de pragas, entre outros – em informações suficientemente claras que facilitassem ao usuário uma tomada de decisão, optando-se por uma abordagem na produção de maçãs, considerando a demanda e a dificuldade apresentada.

Assim, foi criado um *software* de Sistema de Informações Geográficas (SIG) de baixo custo e fácil manuseio (Longo et al., 2020), cujo objetivo é gerar mapas que permitem apresentar ao produtor informações de maneira a simplificar a interpretação de dados brutos obtidos de processos de monitoramento no campo, gerando subsídios para a tomada de decisão, tanto para o manejo do pomar quanto para a destinação do fruto colhido.

2 O SISTEMA APPLESHOW

O *software* APPLESHOW é uma ferramenta computacional, que permite reunir, interpretar e apresentar informações relativas à produção agrícola, de maneira a facilitar o entendimento e as tomadas de decisões no ciclo produtivo por meio da utilização de mapas temáticos, em substituição às diversas planilhas de dados normalmente utilizadas. É um Sistema de Informações Geográficas (SIG), que nasceu da necessidade de organização de dados agrícolas em uma forma de mapas com capacidade de interposição e inter-relação de camadas para a análise mais próxima das informações dispostas.

Seu diferencial é ser independente de um único datum (sistema de referência geográfica), permitindo assim a geração de mapas a partir de um plano cartesiano criado pelo usuário com base na propriedade rural. Isso nasceu da sua principal aplicação projetada, que é analisar mapas de qualidade de frutas para consumo *in natura* em pomares, os quais, na maioria das vezes, pela sua forma de implantação, já são estabelecidos na forma de um sistema de coordenadas próprias, seguindo a linha do plantio e a posição de cada planta. Caso haja necessidade de correlacionar os dados a um mapa com datum, como o uso dos mapas gerados pelo APPLESHOW sobre imagens de satélite ou outros mapas georreferenciados, basta a conversão das coordenadas ao datum apropriado.

A linguagem de programação utilizada para o desenvolvimento do APPLESHOW foi Java, desenvolvida pela empresa Sun Microsystems, que tem como uma das suas principais características ser orientada a objetos, sendo capaz de criar aplicativos voltados para o uso em desktops ou para a Web, sendo *softwares* robustos, completos e independentes, voltados para aplicações comerciais (Claro; Sobral, 2008; Geary; Horstmann, 2010). O banco de dados utilizado foi o PostgreSQL, que é um *software* de código fonte aberto, disponibilizado de maneira gratuita (Ribamar, 2006) e que permite a integração com a extensão PostGIS, possibilitando o armazenamento de manipulação de dados espaciais. Como servidor web de aplicações, foi utilizado o Apache TomCat, que tem como características principais o fato de ser de uso livre, confiável, configurável, com boa documentação e portabilidade (Benacchio, 2008).

3 ORIGEM DOS DADOS DO EXEMPLO

Os dados utilizados nesta demonstração do APPLESHOW provêm de uma área experimental, utilizada para realização dos testes de desempenho, e está localizada no município de Vacaria, região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. O sistema foi desenvolvido em parceria com a Estação Experimental de Fruticultura de Clima Temperado (EFCT) da Embrapa Uva e Vinho, em Vacaria-RS.

Na Figura 1, a área destacada pelos traços amarelos representa o pomar de maçãs utilizado como área experimental para os testes do sistema, situado na Longitude 50°49’30” Oeste e Latitude 28°30’01”

Figura 1. Localização da área experimental.
Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

Sul, como coordenadas centrais da área. Ele apresenta uma densidade de 1.600 macieiras em 3,13 hectares, visível pela imagem do Google Earth, que utiliza o Datum WGS84.

4 MANUSEIO DO SISTEMA

Por ser um SIG, o sistema permite a construção de mapas na forma de camadas de informação, gerando a oportunidade de gerar comparações no intuito de encontrar correlações ou condições que dependem de duas ou mais variáveis. Com isso, as informações resultantes são apresentadas como mapas resultado, lembrando que os dados de entrada devem estar disponíveis na forma requerida pelo sistema.

Após a inserção da base física (área), é possível inserir as camadas de dados para a criação de mapas baseados no SIG, cadastrando cada camada de dados na opção "cadastrar" do item "Tipo de Amostra", na régua superior da tela.

Deve-se inserir um nome de tipo de atributo da amostra na primeira linha, seguido de uma sigla de identificação do atributo, com três dígitos (alfanuméricos e caracteres especiais), que deve ser igual àquela que consta no arquivo de leitura da amostras na segunda linha e a unidade de medida utilizada na terceira linha, observando que é necessário informar ao sistema se os valores de medida deverão ser considerados em uma ordem crescente ou decrescente. É importante ressaltar que este ponto é aplicado diretamente na legenda, sendo que esta opção irá determinar como as classes de mapas serão qualitativamente organizadas, observando que a legenda sempre será da pior condição (na parte de baixo) para a melhor opção (na parte superior da coluna da legenda).

Por meio da tela de visualização de amostras, o sistema permite a apresentação da localização dos pontos cadastrados e, caso algum seja selecionado pelo usuário, o sistema informa o valor correspondente. A Figura 2 permite visualizar a área correspondente destacada em amarelo e contorno preto, com a marcação dos pontos observados e sua correta localização.

Na etapa seguinte, o sistema deverá carregar os dados numéricos que gerarão as camadas com os mapas temáticos. É importante lembrar que o conjunto de coordenadas da amostra deverá estar correlacionado com o datum do mapa. No caso do Google Earth©, deverá ser o WGS84. Caso haja necessidade de datum próprio, a sugestão seria o uso do Sirgas 2000. O recurso de geração de mapas permite transformar uma amostra de valores georreferenciados em uma variável visual, exibida em formato de mapa e capaz de traduzir os valores da amostra sob um sistema de cores, pré-definido pelo usuário, servindo de ferramenta para a abstração e o entendimento dos valores. A partir de uma amostra qualquer cadastrada no sistema, já é possível utilizar o recurso de geração de mapas.

Considera-se, para este contexto de aplicação, o termo *interpolação*, como um método matemático empregado na atribuição de valores a um conjunto de dados através de estimativas sobre um conjunto discreto de dados pontuais que estão previamente conhecidos. As duas funções de interpolação oferecidas pelo sistema corresponde aos métodos Inverso do Quadrado da Distância e Média Móvel. Na Figura 3, é mostrado o mapa interpolado e apresentado no sistema desenvolvido.

Figura 2. Exemplo de visualização de amostra no sistema.

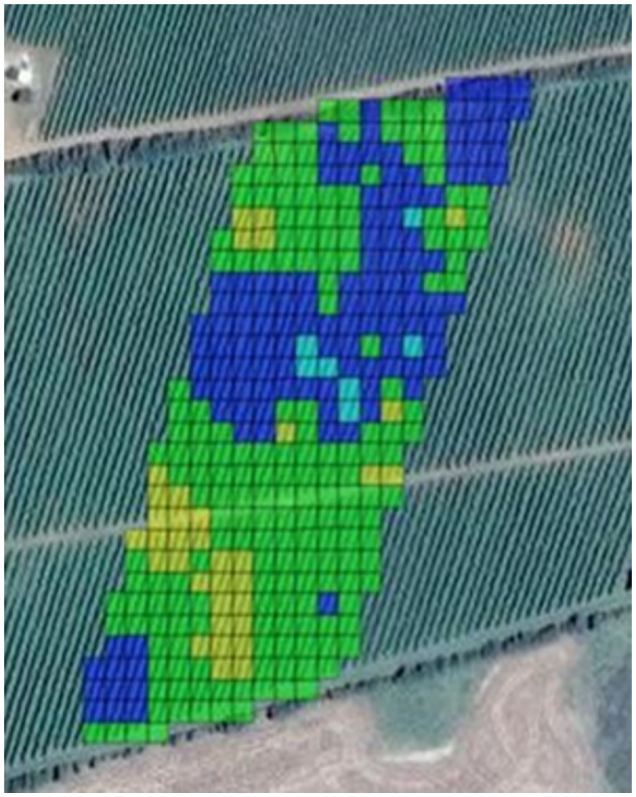


Figura 3. Visualização de modelos de mapas gerados pelo APPLESHOW.

Além da funcionalidade de criação de mapas temáticos, o sistema permite a geração de mapas de qualidade, os quais consistem na elaboração de mapas por meio da avaliação dos resultados obtidos em diferentes interpolações de um mesmo elemento ou na comparação dos resultados de amostras diferentes, normalizando seus parâmetros segundo valores numéricos para a qualidade, sendo sempre o valor um (1) para o parâmetro de qualidade considerado mais baixo. Assim, pode-se trabalhar com mapas de esca-

las diversas ou mesmo invertidas, bastando antes que o usuário execute a classificação dos parâmetros conforme a escala de qualidade do sistema.

Os mapas de qualidade apresentam em cada grade o valor da pontuação obtida com a soma dos valores dos mapas comparados. A soma dos valores consiste em atribuir um valor sequencial, iniciando pelo número um (1) ao primeiro valor da legenda e somando mais um a cada novo intervalo da legenda (classe).

Após atribuir os valores a todas as classes nos mapas selecionados, é realizada a soma dos valores que cada ponto da grade obteve e um novo mapa é confeccionado a partir da soma de valores dos mapas selecionados. Os mapas de pontuação são apresentados em quatro classes de qualidade, independentemente das quantidades de classes que os mapas originais possuem. Pode-se realizar a comparação de até quatro mapas simultaneamente, mesmo com número de classes diferentes, e apresentar o mapa de pontuação.

Na funcionalidade de seleção de mapas para pontuação, o sistema não permite a escolha de mapas com largura de grade diferente ou que pertençam a áreas distintas.

A capacidade de geração de mapas de qualidade confere ao usuário do sistema uma ferramenta importante, capaz de:

- Por meio de amostras de atributos físicos e/ou químicos do solo, confeccionar um mapa resultado visual que apresente a distribuição dos pontos de maior capacidade produtiva do solo, assim como as zonas que mais necessitam de alguma forma de correção, que podem ser caracterizadas como diferentes zonas de manejo;
- Realizar comparações de amostras de aspectos de produção, como, no caso da produção de maçãs, gerar mapas que apresentam um somatório das condições de qualidade do fruto em determinado momento.

No intuito de ilustrar a capacidade de geração de mapas de pontuação que expressem a qualidade de determinado conjunto de amostras, na Figura 4 são exibidos os mapas de duas características físico-químicas dos frutos das macieiras que serão utilizados para a geração do mapa de pontuação, referentes a: 1) pressão (lbs.cm^{-2}), também conhecida por firmeza da polpa, medida pela aplicação de pressão por penetrômetro; e 2) teor de sólidos solúveis (°Brix), determinados por refratometria. Em seguida, devem-

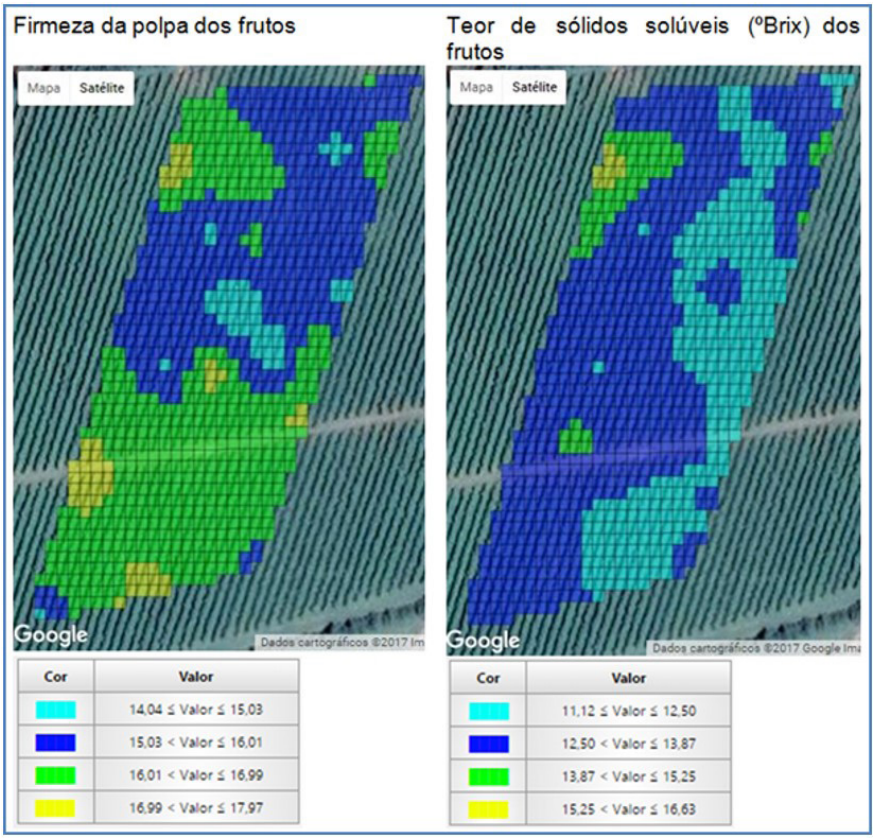


Figura 4. Mapas de firmeza da polpa e sólidos solúveis dos frutos gerados pelo APPLESHOW.

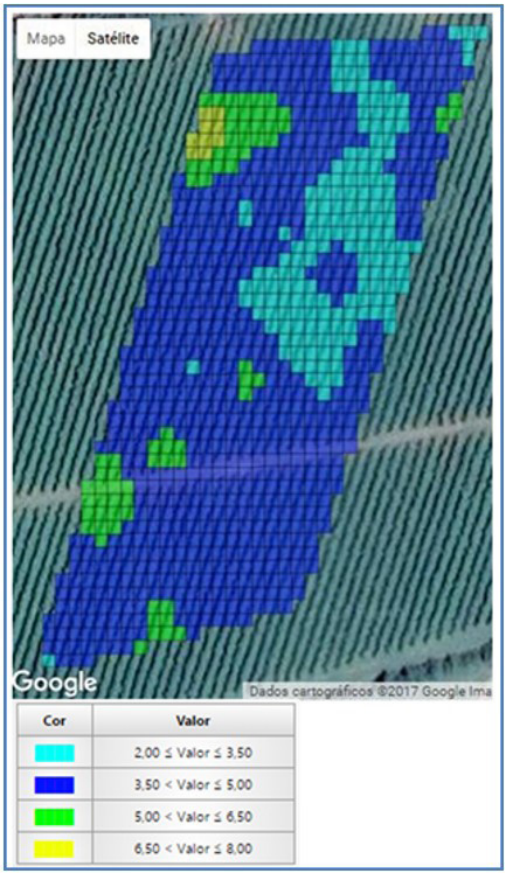


Figura 5. Mapa de pontuação (correlação dos mapas de firmeza da polpa e teor de sólidos solúveis) gerado pelo sistema.

-se classificar os parâmetros segundo uma escala de qualidade, partindo-se de1 (o mais baixo) até 4, valor mais utilizado para limite superior da escala.

O mapa da Figura 2 foi gerado utilizando 40 pontos observados em amostras coletadas na safra 2013, na área experimental mencionada anteriormente. Para interpolação, foi utilizado o algoritmo do Inverso da Distância elevado a uma Potência (IDP), considerando, para cada ponto calculado, os dez pontos observados mais próximos. A largura de grade escolhida foi a de cinco metros, o que representa 25 metros quadrados (m^2) para cada quadriculado. O mapa resultado de qualidade (Figura 5) é resultado da pontuação da soma de pixel a pixel dos mapas 1 e 2, aplicando-se uma nova classificação de qualidade simplificada em quatro níveis, sendo 2 o valor mais baixo e 8, o valor mais alto, gerando zonas de qualidade das frutas segundo os dois parâmetros iniciais na área avaliada.

A geração de mapas de pontuação para as amostras de firmeza de polpa e sólidos solúveis das maçãs de determinada área tem o intuito de analisar as zonas que possam estar com os frutos mais maduros e que, consequentemente, possam ser colhidos primeiramente. Na Figura 5, nos locais em que as quadriculas estão em amarelo ou verde, encontram-se as áreas que apresentaram a maior pontuação, considerando as amostras de firmeza da polpa e teor de sólidos solúveis, indicando um estado de maturação adiantado quando comparadas com as áreas em azul claro ou azul marinho.

5 CONCLUSÕES

O sistema APPLESHOW apresenta-se apto a servir de ferramenta rápida e de baixo custo de apoio a tomadas de decisões, no âmbito de manejo e reconhecimento de características de áreas de produção e no trabalho de produção de maçã. Ademais, como ferramenta de SIG, ele está disponível para ser utilizado para qualquer cultura perene que demande avaliação de qualidade de seus frutos, permitindo a geração de mapas de zonas de manejo baseados em qualidade de sua produção.

REFERÊNCIAS

BENACCHIO, A. **Definição de uma arquitetura integrada de repositório de padrões e metadados**. 2008.

Dissertação (Mestrado em Informática) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

CLARO, D. B.; SOBRAL, J. B. M. **Programação em Java**. Florianópolis: Copyleft Pearson Education, 2008.

GEARY, D.; HORSTMANN, C. **Core JavaServer Faces**. 3. ed. Boston: Pearson Education, 2010.

GONZALEZ, B. C. R.; COSTA, S. M. A. L. Agricultura brasileira: modernização e desempenho. **Revista Teoria da Evidência Econômica**, v. 5, n. 10, p. 7-35, 1998.

GOOGLE EARTH. 2017. Disponível em: https://www.google.com.br/earth/. Acesso em: 20 maio 2021.

KIST, B. B. **Anuário brasileiro da fruticultura 2018**: Brazilian fruit yearbook. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta, 2018. Disponível em: https://www.editoragazeta.com.br/flip/anuario-fruticultura-2018/files/assets/common/downloads/publication.pdf. Acesso em: 20 maio 2021.

LONGO, D. R.; MOREIRA, G. C.; BAZZI, C. L.; GEBLER, L.; SCHENATTO, K. **APPLESHOW**: sistema de informação geográfica para mapeamento da qualidade de maçã. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2020 (Circular Técnica).

RIBAMAR, F. S. **PostgreSQL prático**. São Paulo: Edição do Autor, 2006 157 p.

Uso de espectrorradiometria para detecção de cancro europeu em macieira

52

Use of spectroradiometrics to detect European canker in apple trees

Silvio André Meirelles Alves[1], Claudia Cardoso Nunes[2], Lúcio de Paula Amaral[3], Luciano Gebler[4]

[1] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, silvio.alves@embrapa.br*
[2] *Bolsista DTI, Embrapa Uva e Vinho, Estação Experimental de Fruticultura de Clima Temperado (EFCT), Vacaria (RS), cldc.nunes@gmail.com*
[3] *Professor, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria (RS), Brasil, lucio.amaral@ufsm.br*
[4] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br*

RESUMO

O cancro europeu, causado pelo fungo Neonectria ditissima, é a doença mais expressiva nos pomares de macieira da região Sul do Brasil. A doença afeta principalmente as partes lenhosas da planta e também causa podridões em frutos. O cancro europeu causa modificações no metabolismo vegetal pelo bloqueio na translocação de água e nutrientes para partes periféricas da planta. O principal método de controle consiste em podar as partes doentes e realizar em seguida a pintura do ferimento com tinta e fungicida. A correta identificação de ramos doentes, principalmente de forma precoce, é fundamental para a remoção dos cancros nos pomares. Portanto, o desenvolvimento de métodos de detecção das partes doentes por sensoriamento proximal, principalmente em estádios iniciais, representa mais agilidade e eficiência para o controle da doença. Neste contexto, foi avaliado se as alterações causadas pelo cancro europeu no metabolismo vegetal são perceptíveis no espectro de reflectância, avaliando-se tecidos com cancro e tecidos sadios. As medições foram realizadas com um espectrorradiômetro modelo FieldSpec nos comprimentos de onda de 325 a 1.075 nm, em ramos de macieira coletados em pomar experimental pertencente à Embrapa Uva e Vinho, em Vacaria-RS. Os resultados obtidos mostraram diferenças na reflectância acima de 700 nm entre tecidos sadios e afetados por cancro europeu. Portanto, a reflectância espectral pode ser utilizada como parâmetro para avaliar o estado de saúde das plantas em relação ao cancro europeu, identificando sua posição na planta e desta no pomar, facilitando seu manejo e controle. Isso evidencia que há possibilidade de serem desenvolvidos equipamentos com sensores de detecção para automatizar a diagnose de plantas ou tecidos infectados por Neonectria ditíssima, permitindo o manejo da doença com técnicas baseadas em fruticultura de precisão.

Palavras-chave: espectroscopia Vis-NIR; sanidade do pomar; monitoramento de doenças; fruticultura de precisão.

ABSTRACT

European canker, caused by the fungus Neonectria ditissima, is the most expressive disease in apple orchards in southern Brazil. The disease mainly affects the woody parts of the plant and also causes fruit rot. The main disease control method consists of pruning the diseased parts and then painting the wound with paint and fungicide. The correct identification of diseased branches, especially at an early stage, is essential for the removal of cankers in orchards. Therefore, the development of detection methods by proximal sensing for diseased parts, especially at early stages, would provide quicker, more efficient disease control. European canker causes changes in plant metabolism by blocking the translocation of water and nutrients to peripheral parts of the plant. Given this, we evaluated whether the changes caused to plant metabolism by European canker are perceptible in the reflectance spectrum, assessing healthy tissue and tissue with cankers. Measurements were performed with a FieldSpec model spectroradiometer at wavelengths from 325 to 1075 nm, in apple tree branches collected in an experimental orchard belonging to Embrapa Uva e Vinho, Vacaria-RS. The results obtained showed differences in reflectance above 700 nm between healthy and European canker-affected tissues. Therefore, spectral reflectance can be used as a parameter to assess the health of plants in relation to European canker. This shows that it is possible to develop equipment with detection sensors to automate the diagnosis of plants or tissues infected by N. ditissima, providing disease management techniques based on precision fruit growing.

Keywords: Vis-NIR spectroscopy; orchard health; disease monitoring; precision fruit growing.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000025

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

A produção de maçãs no Brasil está concentrada na região Sul, que é responsável por 99% do total produzido no País. De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022), a área plantada com macieiras no Brasil é de 32.468 ha. Atualmente, a maior área cultivada com maçãs no País está no estado do Rio Grande do Sul, com 15.689 ha, seguido de Santa Catarina, com 15.441 há, e Paraná, com 994 ha. Há também relativa produção nos estados de Minas Gerais e São Paulo. No ano de 2022, o Brasil produziu cerca de 1,04 milhão de toneladas de maçãs, colocando-o entre os 15 principais produtores mundiais (Food Agriculture Organization, 2024).

Dentre os desafios para a produção, destaca-se a doença conhecida cancro europeu, causado pelo fungo Neonectria ditissima, uma das principais doenças da macieira nas condições da região produtora no sul do Brasil. A partir de sua constatação oficial no Brasil, no ano de 2012, foram conduzidos vários experimentos para conhecer a doença nas condições nacionais (Alves; Czermainski, 2019). Para a ocorrência da infecção, é necessária a existência de ferimentos no hospedeiro. A doença afeta principalmente as partes lenhosas da planta e também causa podridões em frutos (Alves; Nunes, 2017).

O principal método de controle consiste em realizar podas das partes doentes e a eliminação das fontes de inóculo. É recomendado realizar a pintura dos ferimentos com uma mistura de tinta e fungicida, pois a cicatrização natural não evita a infecção nas primeiras semanas após a poda (Nunes; Alves, 2020). Nos pomares da região Sul do Brasil, é comum a realização de podas no inverno, estação em que as plantas se encontram na fase de repouso vegetativo. Entretanto, para controle do cancro europeu, se faz necessária a realização de podas com uma frequência maior ao longo do ciclo produtivo. A remoção dos cancros com poda é uma tarefa onerosa, demanda tempo e depende da correta identificação da doença. Além disso, a distribuição da doença nos pomares não é uniforme, o que dificulta dimensionar a mão de obra para as podas fitossanitárias.

Cancros mais velhos e maiores são facilmente detectados, já os cancros jovens e pequenos são mais difíceis de encontrar em meio à copa das plantas. É importante destacar que quanto mais precoce for a detecção e remoção do cancro, mais efetivo será o seu controle, pois quando os cancros já são considerados velhos, ou seja, com mais de um ano, isso significa que o patógeno já passou pela fase reprodutiva, aumentando a disseminação da doença. Neste contexto, o desenvolvimento de métodos de detecção das partes doentes, principalmente em estádios iniciais, representa mais agilidade e eficiência para o controle do cancro europeu em pomares de macieira.

A reflectância espectral pode ser utilizada como parâmetro para avaliar o estado de saúde das plantas. Os padrões de reflectância de uma planta são influenciados pelas características da superfície da folha, da arquitetura interna e da composição bioquímica (Pithan, 2019). O comportamento espectral é dado pela reação da radiação a diferentes alvos em relação ao seu iluminante, com influência das suas características químicas e físicas (Novo, 2010). As doenças bióticas induzem alterações perceptíveis no espectro de reflectância das plantas, especialmente devido a mudanças no conteúdo de clorofila e água, entre outros fatores. Os comprimentos de ondas espectrais investigados como preditores do estado de saúde das plantas, normalmente, variam de 400 a 2.500 nm (Pithan, 2019).

Em plantas atacadas por patógenos, acontecem modificações na interação entre os tecidos vegetais e a radiação eletromagnética devido a alterações no processo fotossintético e nas estruturas celulares, o que consequentemente altera a reflectância das folhas e do dossel (Mahlein, 2016). O cancro europeu causa modificações no metabolismo vegetal pelo bloqueio na translocação de água e nutrientes para as partes mais periféricas da planta. Neste contexto, desejou-se investigar se e as alterações causadas pelo cancro europeu no metabolismo vegetal são perceptíveis no espectro de reflectância espectral.

Com o objetivo de avaliar a técnica de espectrorradiometria para determinar o status fisiológico das plantas quanto à presença de cancro europeu, realizou-se um estudo para medir a reflectância em ramos de macieira, avaliando-se tecidos doentes e sadios.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Em um pomar experimental de macieiras pertencente à Embrapa Uva e Vinho, foram coletados ramos de crescimento do ano (agosto de 2019), com aproximadamente 0,5 cm de diâmetro, contendo uma única lesão de cancro europeu. Em seguida, esses ramos foram levados ao laboratório de fitopatologia, onde foram feitas medições com um espectrorradiômetro nas porções sadias e doentes. Foi usado o modelo FieldSpec2 nos comprimentos de onda de 325 a 1.075 nm.

As medições de reflectância dos ramos foram feitas com o módulo de clipagem (Plant probe with leaf clip). Primeiramente, os ramos foram cortados transversalmente em segmentos de aproximadamente 2 cm de comprimento e identificados como porção antes

do cancro (posição mais basal do ramo), no cancro e depois do cancro (posição mais apical) (Figura 1). Em seguida, esses segmentos foram cortados no sentido longitudinal de maneira para que fossem formadas lascas e então foram feitas novas leituras. Numa terceira etapa, as lascas foram picadas em pedaços menores, de aproximadamente 3 mm na sua maior dimensão, e feitas novas leituras. Nos ramos inteiros e em lascas, foram analisadas cinco amostras de cada porção, e no material picado, foram feitas três amostras de cada porção.

Os dados obtidos nas leituras foram transferidos para um computador e analisados em planilha de cálculo Microsoft Excel, por meio da construção de gráficos da reflectância em função do comprimento de onda e da subtração dos valores de reflectância entre tecidos sadio e doente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As medições feitas nos ramos com os três processamentos das amostras demonstrou que, na porção antes do cancro, há aumento rápido na reflectância acima de 700 nm (Figura 2A, D e G); por outro lado, nas medições feitas no cancro, o crescimento da reflectância em função dos comprimentos de onda foi mais gradual (Figura 2B, E e H). O perfil de reflectância dos tecidos após o cancro foram mais variados, ora semelhante ao perfil do tecido antes do cancro, ora semelhante, em outras amostras, ao perfil do tecido no cancro (Figura 2C, F e I). Além disso, em todas as partes analisadas, houve grande variação (ruído) da reflectância abaixo de 400 nm.

Os resultados revelaram diferenças na reflectância acima de 700 nm comparando-se tecidos sadios (antes do cancro) e doentes (no cancro), com máxima entre 840 e 850 nm (Figura 3). Isso poderá ser útil para o desenvolvimento de equipamentos que facilitem ou automatizem a identificação e localização das plantas doentes.

A evidência de diferenças na reflectância indica que, com estudos mais detalhados e adequação de equipamentos para condições de uso a campo, há potencial para desenvolvimento de uma técnica de detecção de cancro europeu em tempo real, favorecendo principalmente a identificação precoce dos tecidos doentes.

Como os sintomas característicos variam dependendo da doença, diferentes comprimentos de onda são adequados para a detecção de diferentes doenças e da gravidade da infecção (Mutanga et al., 2017). De acordo com Pithan (2019), os comprimentos de ondas espectrais investigados como preditores do estado de saúde das plantas, normalmente, variam de 400 a 2.500 nm.

Quando se realizam medições espectrais usando espectrorradiômetro, uma grande quantidade de dados espectrais é gerada, tornando necessária a realização de um pré- processamento e uma seleção dos dados (Bulanon et al., 2013; Pithan, 2019). No estudo realizado, o banco de dados foi selecionado em busca de diferenças no padrão de reflectância visando a uma comparação entre tecidos sadios e afetados com cancro europeu.

É importante selecionar os comprimentos de onda mais relevantes para o estudo da interação patógeno-hospedeiro no nível de conjunto de dados hiperespectrais. As informações preliminares geradas com este estudo já apresentam um direcionamento para selecionar comprimentos de onda mais adequados para a realização das medições.

Este conhecimento é importante para que se possa evoluir futuramente em termos de técnicas de detecção de cancro europeu em macieira, com o desenvolvimento de sensores e adaptação de equipamentos mais simples e de baixo custo.

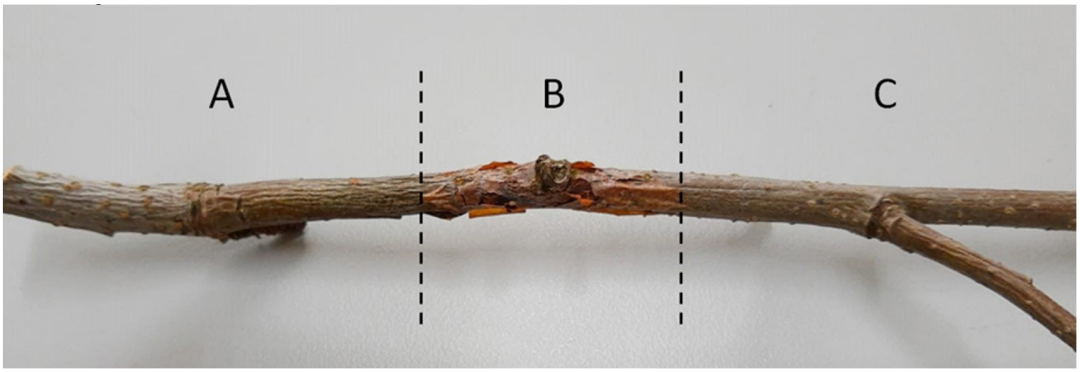


Figura 1. Ramo de macieira com sintomas de cancro europeu (causado pelo fungo Neonectria ditissima), evidenciando os segmentos: a) antes do cancro, b) no cancro e c) após o cancro, para medição de reflectância nos tecidos sadios e doentes.

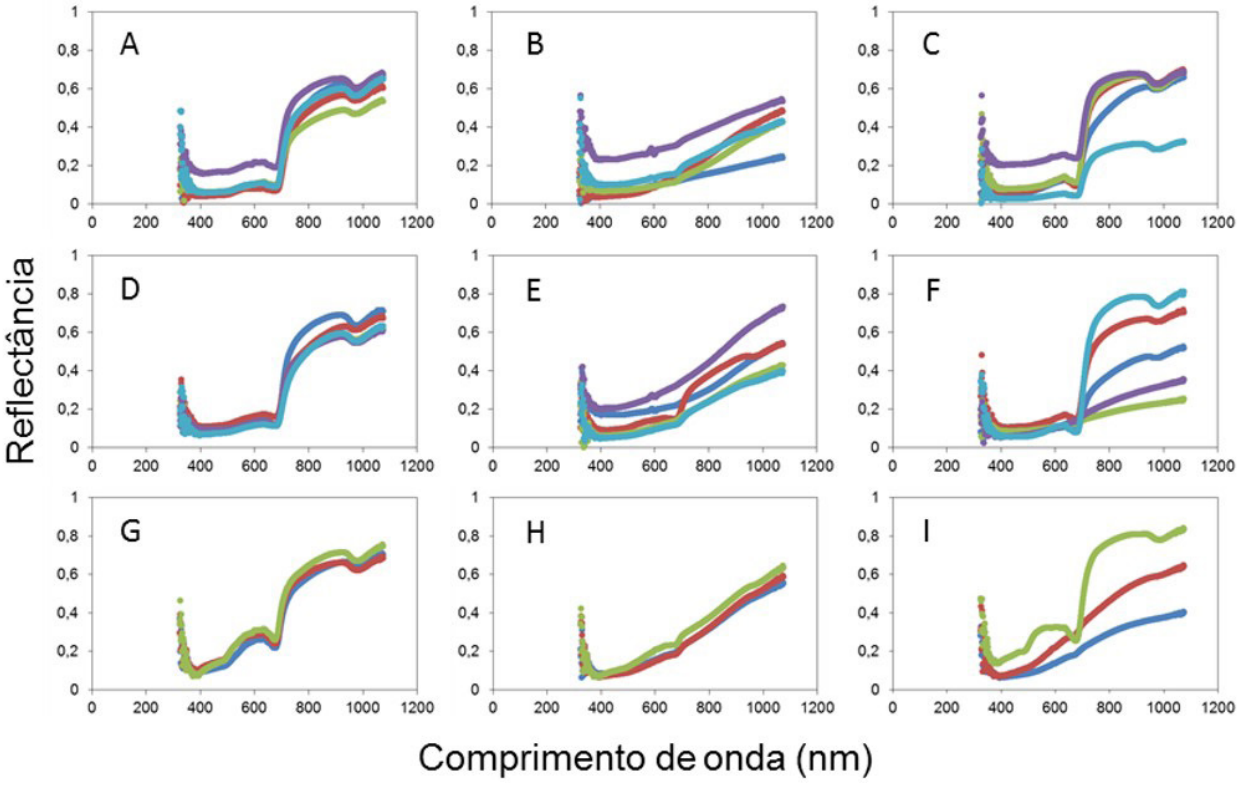


Figura 2. Curvas de reflectância mensuradas em ramos de macieira: em ramos inteiros (A, B e C), em lascas de ramos (D, E e F) e em ramos picados (G, H e I). As medições foram feitas em porções antes do cancro (A, D e G), no cancro (B, E e H) e após o cancro (C, F e I). As cores nos gráficos representam a leitura de cada amostra.

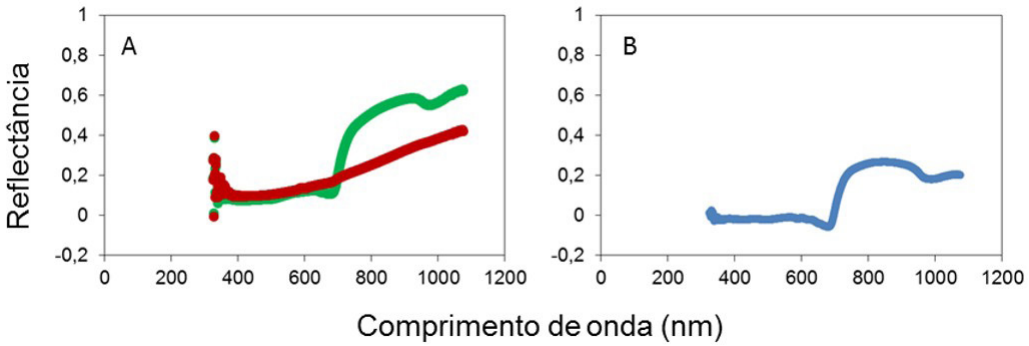


Figura 3. Curva média de reflectância mensurada antes do cancro, linha verde, no cancro, linha vermelha (A), e diferença entre as medições dos tecidos sadios (antes do cancro) e doentes (na superfície do cancro) (B).

O cancro europeu em macieira tem sua distribuição no pomar em função de sua incidência em uma dada quadra ou pomar. Essa distribuição pode ser aleatória em incidências muito baixas e, com o aumento da incidência, a distribuição tende a formar "hotspots" dentro do pomar (Campbell et al., 2016). O desenvolvimento de equipamentos com sensores nos comprimentos de onda identificados neste estudo poderá ajudar a localizar e quantificar o tamanho desses pontos de concentração de plantas doentes dentro do pomar. Assim, partindo de um dado de sensoriamento, será possível a construção de mapas nos quais será possível identificar zonas diferenciadas para manejo da doença e aplicação das técnicas de fruticultura de precisão. O tomador de decisão terá mais facilidade para realizar o controle da doença por meio do mais preciso dimensionamento da mão de obra e insumos necessários, de acordo com as zonas de manejo.

4 CONCLUSÕES

As alterações no metabolismo vegetal causadas pelo cancro europeu em ramos de macieira, caracte-

rizadas pelo bloqueio na translocação de água e nutrientes, são perceptíveis no espectro de reflectância, sendo que acima de 700 nm há diferenças entre tecidos doentes e sadios. Dessa forma, sensores podem ser adaptados para o desenvolvimento de técnicas de detecção e diagnóstico da doença em tempo real. O georreferenciamento das plantas doentes permitirá a aplicação das técnicas de fruticultura de precisão.

REFERÊNCIAS

ALVES, S. A. M.; CZERMAINSKI, A. B. **O cancro Europeu no Brasil**. Bento Gonçalves: Embrapa, 2019. 190 p.

ALVES, S. A. M.; NUNES, C. C. Seasonal susceptibility of apple trees to Neonectria ditissima wound infections. **New Zealand Plant Protection**, v. 70, p. 73-77, 2017. DOI: http://doi.org/10.30843/nzpp.2017.70.30.

BULANON, D. M.; BURKS, T. F.; KIM, D. G.; RITENOUR, M. A. Citrus black spot detection using hyperspectral image analysis. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 15, n. 3, p. 171-180. 2013. Disponível em: https://cigrjournal.org/index.php/Ejounral/article/view/2382. Acesso em: 30 set. 2022.

CAMPBELL, R. E.; ROY, S.; CURNOW, T.; WALTER, M. Monitoring methods and spatial patterns of European canker disease in commercial orchards. **New Zealand Plant Protection**, v. 69, p. 213-220, 2016.

FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. **Faostat database ProdStat**. Rome: FAO, 2024. Disponível em: faostat.fao.org. Acesso em: 2 maio 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **LSPA: Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html?=&t=destaques. Acesso em: 26 set. 2022.

MAHLEIN, A.-K. Plant disease detection by imaging sensors: parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. **Plant Disease**, v. 100, n. 2, p. 241-251, 2016. DOI: http://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340-FE.

MUTANGA, O.; DUBE, T.; GALAL, O. Remote sensing of crop health for food security in Africa: potentials and constraints. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 8, p. 231-239, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.10.004.

NUNES, C. C.; ALVES, S. A. M. Suscetibilidade de ferimentos de poda a infecção por Neonectria ditissima em macieira. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 18.; ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA EMBRAPA UVA E VINHO, 14., 2020, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2020. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/222770/1/Nunes-p16-ICCNPUV-2020.pdf. Acesso em: 30 set. 2022.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto:** princípios e aplicações. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

PITHAN, P. A. **Dados hiperespectrais aplicados na avaliação de videiras da cultivar Cabernet Sauvignon infectadas com alguns patógenos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

53

Sistema de coleta de imagens para previsão de produção em pomares de maçã

Image collection system for forecasting production in apple orchards

Darlan Alaor Selzlein[1], Carlos Moyses Abrahão Auzi Ribeiro[2], Luciano Gebler[3], Pedro Luiz de Paula Filho[4]

[1] *Bacharel, Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira (PR), Brasil, slz.darlan@gmail.com*
[2] *Graduando, Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira (PR), Brasil, carlosmoyses@gmail.com*
[3] *Engenheiro Agrônomo, Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br*
[4] *Professor Doutor, Ciência da Computação, Departamento de Computação (DACOM), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira (PR), Brasil, pedrol@utfpr.edu.br*

RESUMO

A coleta de imagens é uma importante ferramenta para a agricultura de precisão. Porém, certas culturas, como a da maçã, dificultam sua realização devido ao uso de telas de proteção antigranizo, o que dificulta a utilização de drones. Diante disso, foi elaborado um sistema para a coleta de 4.062 imagens usando-se uma câmera acoplada a um veículo de solo, em um pomar de maçãs localizado no campo experimental da Embrapa Uva e Vinho, em Vacaria, estado do Rio Grande do Sul, Brasil. As imagens foram posteriormente utilizadas na geração de uma imagem panorâmica que compreendesse toda a lateral das fileiras de árvores do pomar e também foram empregadas no treinamento de uma rede neural convolucional, que foi utilizada para a contagem das frutas nas imagens panorâmicas, na intenção de obter uma contagem próxima à real, para que uma estimativa de produção pudesse ser feita. A contagem, no entanto, não obteve resultados estáveis, necessitando aprimoramentos na geração da imagem panorâmica e no treinamento da rede neural. Contudo, o projeto demonstrou a viabilidade e aplicabilidade da ideia.

Palavras-chave: agricultura de precisão; rede neural convolucional; imagem panorâmica.

ABSTRACT

Image collection is an important tool for precision agriculture. However, in certain crops, such as apples, anti-hail screens hinder the use drones for this collection. Therefore, a system was developed to collect 4062 images using a camera attached to a ground vehicle, in an apple orchard located in the experimental field of Embrapa Uva e Vinho, in Vacaria, state of Rio Grande do Sul, Brazil. The images were later used to generate a panoramic image that covered the entire side of the orchard's tree rows. They were also used in a convolutional neural network training to count the fruits in the panoramic images and obtain a count close to the real one to be able to estimate the production. The count, however, did not obtain stable results, requiring improvements in the generation of the panoramic image and the training of the neural network. However, the project demonstrated the viability and applicability of the idea.

Keywords: precision agriculture; convolutional neural network; panoramic image.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000026

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

No sentido de acompanhar o contínuo aumento da necessidade de alimentos, o desenvolvimento tecnológico vem buscando aumentar o potencial produtivo através de transformações nos sistemas agrícolas (Santos; Nascimento, 2009).

Entre as diversas técnicas utilizadas pela agricultura de precisão, pode ser citada a coleta de imagens aéreas, sendo utilizada em trabalhos como o de Feng et al. (2020), os quais, através destas, realizaram um estudo sobre a qualidade de emersão de plantas de algodão, ou em Ferreira et al. (2023), que utilizaram imagens aéreas para confecção de mapas de índices vegetativos em videira. Assim, imagens coletadas de uma área agrícola permitem a realização de estudos, como a estimação de produção ou a previsão de cenários; porém, culturas perenes como a da maçã possuem obstáculos que dificultam a coleta das fotos. Santos e Gebler (2021), em um trabalho sobre modelagem de previsão de colheita em maçã, já haviam detectado este tipo de problema, seja pela configuração da planta em 3-D ou, de ocorrência comum em pomares de maçã, pela utilização de telas de proteção contra intempéries do clima e insetos, impossibilitando a coleta de imagens aéreas e tornando necessária a utilização de uma ferramenta capaz de obter as fotos a partir do solo, por baixo da tela de proteção.

A obtenção das imagens a partir do solo, no entanto, sofre com o desafio de registrar toda a área agrícola com riqueza de detalhes, devido à sua extensão. Com o objetivo de solucionar esse problema, técnicas de processamento de imagens como o *stitching* podem ser utilizadas para o pré-tratamento das fotos e para o estudo e a extração de informações. Essa técnica consiste na colagem de diferentes imagens por meio da sobreposição de áreas semelhantes, formando um mosaico único (Wang; Yang, 2020). A utilização dessa técnica pode ser observada no trabalho de Tarallo et al. (2014), que a utilizam para realizar a colagem de imagens aéreas, posteriormente utilizadas no diagnóstico de queimadas e no reconhecimento de pragas em diversas culturas.

Para extrair informações das imagens obtidas, podem-se utilizar as redes neurais convolucionais (RNC), que são um tipo de inteligência artificial capaz de, após devido treinamento, reconhecer e categorizar padrões em imagens (Aggarwal, 2018), como o reconhecimento de maçãs (Tian et al., 2019).

Diante do exposto, buscou-se a elaboração de uma ferramenta capaz de capturar imagens de pomares de maçãs a partir do solo e que fosse adequada para a aplicação da técnica de *stitching*, para realização da contagem de maçãs e da estimativa da produção por meio do uso de uma RNC.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os pomares de macieiras são geralmente organizados com as árvores distribuídas em fileiras com espaçamento variando de 1,8 a 3,4 metros, e que podem atingir uma altura de até quatro metros (Anzolin et al., 2021).

Para coletar as imagens do pomar a partir do solo, foi montado um sistema de baixo custo embarcado em um trator, composto por uma estrutura retangular de madeira, presa no contrapeso do trator e reforçada por duas travessas a 74 e 82 cm de altura, para o suporte e a estabilização de travessas diagonais laterais do sistema. Também foram utilizadas três câmeras de 720p com conexão USB 2.0 conectadas a um microcomputador Raspberry Pi com 1GB de memória RAM e processador de quatro núcleos. As câmeras foram instaladas a 50 cm uma das outras e anguladas em 45 graus avante para a tomada de imagens verticais de toda a fileira de árvores opostas à sua posição, para permitir uma maior distância focal.

O sistema foi montado de maneira que permitisse a obtenção de imagens de toda a altura da árvore e o microcomputador foi programado para armazenar as imagens das câmeras em intervalos de meio segundo, com o objetivo de garantir que toda a fileira de árvores pudesse ser fotografada. A estrutura montada pode ser observada na Figura 1.

A coleta das imagens foi realizada no campo experimental da Embrapa Uva e Vinho, em Vacaria-RS, no dia 4 de março de 2022. Foram coletadas 2.626 imagens no período da manhã e 1.436 imagens no período da tarde, de ambas as laterais de quatro fileiras de árvores, totalizando 4.062 imagens.

Após a coleta das imagens, diferentes técnicas de *stitching* foram testadas, buscando gerar a imagem panorâmica de toda a lateral de cada fileira do pomar, sobrepondo maçãs que aparecem em mais de uma imagem. Também foram montados panoramas sem realizar a sobreposição das maçãs, mas utilizando diferentes coeficientes de sobreposição vertical e horizontal, para eliminar regiões repetidas nas imagens.

As imagens coletadas também tiveram suas maçãs marcadas, compondo um conjunto de dados para o treino de um modelo de rede neural convolucional (RNC) que fosse capaz de reconhecer as maçãs. O modelo foi então aplicado na contagem de frutas em imagens panorâmicas geradas e os resultados obtidos foram comparados com os resultados reais.

Figura 1. Sistema para coleta de fotos de pomar de maçãs montado em trator.

Figura 2. Imagens coletadas pelas três câmeras do sistema ao mesmo tempo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As imagens coletadas, em absoluta maioria, tiveram qualidade adequada de acordo com a capacidade das câmeras utilizadas, além de possuírem entre si áreas de sobreposição, necessárias para a realização do *stitching*. Na Figura 2, é possível observar a sobreposição entre as três câmeras ao identificar o mesmo grupo de maçãs em todas as fotos. De maneira semelhante, é possível observar a sobreposição entre as imagens coletadas pela mesma câmera em momentos vizinhos, na Figura 3.

Essas imagens foram utilizadas na tentativa de geração de imagens panorâmicas de toda a lateral da fileira de árvores por meio de algoritmos de *stitching* já existentes e utilizados em aplicações reais. Contudo, o excesso de detalhes, a grande quantidade de fotos e a diferença de perspectiva entre estas impediu que esses algoritmos fossem capazes de reconhecer as regiões de sobreposição e realizar a colagem de maneira bem sucedida.

Diante disso, foram criadas imagens panorâmicas artificiais, geradas por meio da colagem das imagens obtidas, utilizando uma taxa de sobreposição vertical e horizontal para eliminar as regiões da imagem presentes nas imagens vizinhas. A colagem de imagens verticais pode ser observada na Figura 4. A colagem das imagens horizontais foi feita de maneira análoga. Os valores utilizados para as taxas de sobreposição foram 0, 0,2, 0,4, 0,6 e 0,8, e foram gerados panoramas para todas as combinações desses valores entre ambas as taxas. Foram obtidos 50 panoramas diferentes para uma fileira de árvores para va-

Figura 3. Imagens pela mesma câmera em tempos vizinhos.

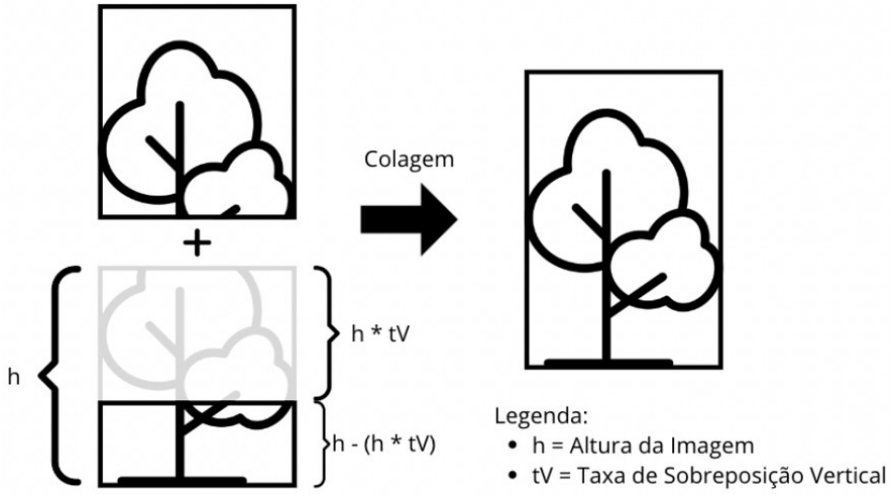


Figura 4. Colagem de imagens na vertical para a geração de panorama artificial.

lidar qual taxa permitiria uma contagem de maçãs mais próxima da real.

As imagens coletadas também tiveram suas maçãs anotadas para que pudessem ser utilizadas para o treinamento do modelo de RNC da família de RNCs YOLOv5. O melhor modelo treinado obteve uma precisão de 82,5% e uma cobertura de 77,8%. Um exemplo de maçãs sendo detectadas pela RNC pode ser observado na Figura 5, na qual as maçãs identificadas estão destacadas e rotuladas com um número que representa a certeza que a rede tem de que o objeto destacado é efetivamente da classe "*apple*".

Esse modelo foi então utilizado na contagem de maçãs em todos os panoramas gerados. O melhor resultado de contagem foi para o panorama com as taxas de sobreposição vertical e horizontal 0 (zero), ou seja, para o panorama em que as imagens foram simplesmente coladas, sem a remoção da região de sobreposição. A contagem de maçãs no panorama foi de 2.062 maçãs e a quantidade real de maçãs colhidas na mesma fileira foi de 1.999. A mesma taxa de sobreposição foi utilizada para a criação de panoramas de outras duas fileiras, e a contagem foi novamente realizada e comparada com os resultados reais. Os valores obtidos podem ser observados na Tabela 1.

Uma vez que anteriormente toda a previsão de colheita era baseada em análise visual por amostragem com base empírica (experiência do avaliador), sendo o resultado agrupado como a média de produtividade para um único talhão produtivo, esta abordagem de contagem é um avanço considerável, demandado pelos produtores, pois pode ser aplicada em toda a extensão do pomar, possibilitando a criação de mapas de produção de maçãs por planta.

Figura 5. Detecção de maçãs realizada pelo modelo de RNC treinado com as imagens coletadas pelo sistema embarcado.

Tabela 1. Contagem de maçãs feita pela RNC em panoramas de diferentes fileiras de árvores.

Fila	Contagem RNC	Contagem Real
1	2062	1999
2	1219	1706
3	1629	2620

Esses mapas podem revelar a variabilidade espacial da produção no pomar, permitindo a identificação de áreas com diferentes níveis de produtividade dentro do talhão e possibilitando assim a criação de zonas de manejo segundo a produtividade das plantas. Esse processo pode, por sua vez, auxiliar na gestão agrícola, ao identificar plantas mais e menos produtivas, bem como na delimitação de zonas homogêneas de produtividade, subsidiando tomadas de decisão mais assertivas, como, por exemplo, para o preparo da logística de colheita.

4 CONCLUSÕES

O sistema para a coleta de fotos dos pomares de maçãs a partir do solo se mostrou capaz de coletar imagens adequadas para a realização de estudos. Porém, melhorias devem ser estudadas para que se aumente a eficiência do processo.

A coleta das imagens foi realizada de maneira bem sucedida, demonstrando a viabilidade prática do protótipo de obtenção das imagens. Entretanto, a utilização de câmeras com maior definição pode permitir o melhor uso das imagens coletadas

Não foi possível realizar o *stitching* das imagens utilizando ferramentas de *software* já disponíveis, porém, com a aplicação de uma técnica paralela para a geração de imagens panorâmicas, mostrou-se possível a obtenção de resultados mais confiáveis.

O treinamento do modelo de RNC demonstrou que é possível realizar o reconhecimento e a contagem de maçãs com as imagens obtidas, porém ainda há bastante espaço para aprimoramento através de novos treinamentos ou uso de diferentes modelos para a obtenção de resultados ainda melhores na identificação das frutas pela rede.

O uso do modelo de RNC para a contagem de maçãs nas imagens panorâmicas foi eficaz, realizando a contagem das frutas de uma fileira inteira de árvores de maneira rápida. Os números da contagem, no entanto, demonstraram instabilidade nos resultados. Para que resultados mais estáveis sejam obtidos, são necessárias melhorias na técnica de colagem das imagens, bem como no treinamento do modelo.

Embora o protótipo criado não tenha realizado uma contagem precisa, foi capaz de demonstrar a aplicabilidade da ideia, que pode ser aprimorada, bem como associada a outras tecnologias, como a utilização de geolocalizadores para a geração de mapas de produtividade ou zonas de manejo nos talhões produtivos.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa, pelo suporte e pela disponibilização do campo experimental para a realização dos experimentos, e a Tassiane Barbara Perico Anzolin, por ter realizado os estudos iniciais que culminaram na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

AGGARWAL, C. C. **Neural networks and deep learning**. Cham: Springer, 2018. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-319-94463-0.

ANZOLIN, T. B. P.; PAULA FILHO, P. L.; GEBLER, L.; TONIN, P. C. Desenvolvimento de mosaico de imagens para automatização de processos na fruticultura de precisão. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE SOFTWARE LIVRE E TECNOLOGIAS ABERTAS, 18., 2021, Foz do Iguaçu.

Anais [...]. Foz do Iguaçu: Latinoware, 2021. DOI: http://doi.org/10.5753/latinoware.2021.19926.

FENG, A.; ZHOU, J.; VORIES, E.; SUDDUTH, K. A. Evaluation of cotton emergence using uav-based narrow-band spectral imagery with customized image alignment and stitching algorithms. **Remote Sensing**, v. 12, p. 1764, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/rs12111764.

FERREIRA, R. A.; CARVALHO, L. F. D.; OLIVEIRA FOGAÇA, A.; PAULA AMARAL, L.; GEBLER, L; AMADO, T. J. C. Análise da variabilidade espacial e zonas de produtividade em vinhedos, no Vale Central Gaúcho. **NATIVA**, v. 11, p. 297-308, 2023. DOI: http://doi.org/10.31413/nat.v11i3.15696.

SANTOS, A.; NASCIMENTO, F. Transformações ocorridas ao longo da evolução da atividade agrícola: algumas considerações. **Enciclopédia Biosfera**, v. 5, n. 8, 2009.

SANTOS, T. T.; GEBLER, L. A methodology for detection and localization of fruits in apples orchards from aerial images. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 13., Bagé. **Anais** [...]. Bagé: Unipampa, 2021. p. 1-9. DOI: http://doi.org/10.5753/sbiagro.2021.18369.

TARALLO, A. S.; HIRAGA, A. K.; GAVIRA MARTINEZ, G. A.; PAIVA, M. S. V.; JORGE, L. A. C.; SENGER, H. Uso de mosaico de imagens aéreas como ferramenta de auxílio ao diagnóstico de diversas culturas. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Eds.). **Agricultura de precisão:** resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 157-164.

TIAN, Y.; YANG, G.; WANG, Z.; WANG, H.; LI, E.; LIANG, Z. Apple detection during different growth stages in orchards using the improved yolo-v3 model. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 157, p. 417-426, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.012.

WANG, Z.; YANG, Z. Review on image-stitching techniques. **Multimedia Systems**, v. 26, p. 413-430, 2020. DOI: http://doi.org/10.1007/s00530-020-00651-y.

54

Uso do DA-Meter como método não destrutivo no monitoramento da maturação de maçãs

Use of DA-Meter as a non-destructive monitoring method for ripening in apples

Lucimara Rogéria Antoniolli[1], Elenilson Godoy Alves Filho[2], Daniela Dal Bosco[3], Leo Rufato[4], Luciano Gebler[5]

[1] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, lucimara.antoniolli@embrapa.br*
[2] *Professor, Universidade Federal do Ceará, Depto de Engenharia de Alimentos, Fortaleza (CE), Brasil, elenilson.godoy@yahoo.com.br*
[3] *Assistente de Pesquisa, Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, daniela.bosco@embrapa.br*
[4] *Professor, Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciência Agroveterinárias, Depto de Agronomia, Lages (SC), Brasil, leoruffato@yahoo.com.br*
[5] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Estação Experimental de Fruticultura de Clima Temperado, Vacaria (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br*

RESUMO

Métodos não destrutivos de análise são importantes à medida que possibilitam avaliações múltiplas e podem complementar ou substituir os métodos destrutivos convencionais. Este capítulo apresenta a correlação entre o Índice de Diferença de Absorbância (I_{DA}), obtido de maneira não destrutiva a partir do equipamento DA-Meter, e os atributos de qualidade avaliados de maneira destrutiva na determinação da maturação de maçãs. Os parâmetros para monitoramento do avanço da maturação foram igualmente investigados, visando ao estabelecimento do protocolo de uso do DA-Meter em maçãs 'Fuji Suprema'. Foram conduzidos dois ensaios em safras consecutivas, 2018/2019 e 2019/2020, quando foram coletados dados sobre a linha do pomar, a face da planta, a altura de coleta dos frutos, a data de coleta considerada como dias após a plena floração (DAPF) e o lado de exposição do fruto à radiação solar. Os frutos foram avaliados quanto aos parâmetros: I_{DA}, cor da casca, firmeza de polpa, teores de sólidos solúveis e de acidez titulável, índice de regressão do amido e cor de semente. Os resultados indicaram que o DA-Meter pode ser empregado no monitoramento da evolução da maturação de maçãs 'Fuji Suprema' cultivadas nas condições climáticas do Rio Grande do Sul, para fins de determinação do início da colheita. O monitoramento da evolução da maturação com o DA-Meter deve-se iniciar entre 142 e 147 DAPF, sendo as leituras obtidas no lado do fruto exposto à luz solar. Por fim, as correlações entre I_{DA} e firmeza de polpa, e entre I_{DA} e sólidos solúveis permitem a substituição dessas avaliações destrutivas comumente empregadas para avaliação da maturação de maçãs pelo I_{DA}.

Palavras-chave: agricultura de precisão; espectroscopia VIS/NIR; Índice de Diferença de Absorbância (I_{DA}); firmeza de polpa; sólidos solúveis; predição de colheita.

ABSTRACT

Non-destructive analysis methods are important as they allow multiple evaluations and can supplement or replace conventional destructive methods. This study sought to verify a correlation between I_{AD}, obtained in a non-destructive way using DA-Meter equipment, and quality attributes, ascertained via destructive methods, for the determination of apple ripening. The parameters for monitoring the progress of ripening were also investigated, aiming to establish a protocol to use the DA-Meter with 'Fuji Suprema' apples. Two trials were carried out in consecutive harvest years, 2018/2019 and 2019/2020, where the following collection parameters were studied: orchard row, tree face, height of fruit collection on trees, picking day as days after the full bloom (DAPF), and the fruit side to the sunlight. Apples were evaluated for I_{AD}, skin color, flesh firmness, soluble solids content, titratable acidity, starch index, and seed color. The results showed that the DA-Meter can be used to monitor the ripening of 'Fuji Suprema' apples grown in Rio Grande do Sul State, Brazil, in order to establish the beginning of the harvest.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000027

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

Monitoring ripening progress with the DA-Meter should start from 142 to 147 DAFB. The readings must be obtained on the exposed side of the fruit. Finally, the correlation between I_{AD} and flesh firmness, and between I_{AD} and soluble solids content can replace the destructive evaluations commonly used to evaluate apple ripening by I_{AD}.

Keywords: precision agriculture; VIS/NIR spectroscopy; index of absorbance difference (I_{AD}); flesh firmness; soluble solids content; harvest time prediction.

1 INTRODUÇÃO

Métodos não destrutivos de monitoramento do avanço do amadurecimento dos frutos na planta proporcionam várias vantagens quando comparados aos métodos destrutivos tradicionais, tais como alto rendimento de avaliações, medidas múltiplas simultâneas e possibilidade de tomada de decisão em tempo real (Li et al., 2018). Seu uso junto à fruticultura de precisão possibilita a criação de mapas de previsão da qualidade do fruto semanas antes da colheita, permitindo o planejamento da estrutura, dos insumos e da mão de obra desta etapa com antecedência e, consequentemente, o aumento da eficiência e da lucratividade. Atualmente, o relatório de qualidade dos frutos de uma quadra ou talhão é emitido somente após a classificação dos frutos no *packing house*, perdendo-se a rastreabilidade do ponto e impedindo a geração de mapas de colheita associados ao manejo espacial do talhão.

Os métodos de espectroscopia na região do visível e do infravermelho próximo (VIS/NIR) podem ser especialmente úteis na indicação do estádio de maturação para a colheita de frutos, de forma a reduzir perdas e desperdícios decorrentes da colheita de frutos imaturos ou sobremaduros (Costa et al., 2017). O DA-Meter é um espectrômetro portátil e de fácil utilização que mede a clorofila 'a' na casca e na polpa do fruto. O instrumento fornece um índice de diferença entre as absorbâncias (I_{DA}) obtidas a 670 nm e a 720 nm (Ziosi et al., 2008; Costa et al., 2017). As respostas do DA-Meter são dependentes da cultivar (Reig et al., 2012) e das condições climáticas das diferentes áreas de produção (DeLong et al., 2020). Outra vantagem é que o índice pode ser vinculado às coordenadas espaciais das plantas do pomar, permitindo a geração de mapas sobre a variabilidade espacial do I_{DA} e o acompanhamento da curva de maturação e da qualidade de frutos (variabilidade temporal).

O uso do DA-Meter tem sido amplamente avaliado na cultura da macieira para monitorar a evolução do amadurecimento, definir a data de colheita (Costamagna et al., 2013; DeLong et al., 2014; Magro et al., 2018), estabelecer a relação entre o I_{DA} e os atributos de qualidade na colheita e após armazenamento (Nyasordzi et al., 2013; Toivonen; Hampson, 2014), assim como desenvolver modelos de maturação que indiquem janelas de elevada qualidade comercial (DeLong et al., 2014; DeLong et al., 2016, 2020).

O objetivo deste trabalho foi buscar uma correlação entre o I_{DA}, obtido de maneira não destrutiva a partir do equipamento DA-Meter, e os atributos de qualidade avaliados de maneira destrutiva na determinação da maturação de maçãs. Os parâmetros para monitoramento do avanço da maturação foram igualmente investigados, visando ao estabelecimento do protocolo de uso do DA-Meter em maçãs 'Fuji Suprema'.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Maçãs 'Fuji Suprema' foram colhidas em pomar da Estação Experimental de Fruticultura de Clima Temperado (EFCT) da Embrapa Uva e Vinho localizado em Vacaria, RS (28°30'S, 50°52'W, 920 m altitude) (Figura 1). A cultivar está sobre o porta-enxerto M-9. O pomar, com cinco anos de idade, está implantado em espaçamento de 1,25 × 4,00 m e sistema de condução Tall Spindle. Foram conduzidos dois ensaios em safras consecutivas, 2018/2019 e 2019/2020. Nessas safras, a plena floração da cultivar ocorreu em 02/10/2018 e 07/10/2019, respectivamente.

Para a condução dos ensaios, foram selecionadas duas filas do pomar (α e β) com 60 plantas cada uma. Uma das filas corresponde ao limite do pomar (α), de forma que os frutos foram coletados da sua face externa, com incidência solar direta, e da sua face interna, voltada para a fila adjacente. A outra fila selecionada (β) teve os frutos colhidos em somente uma das faces, considerada como face interna. As coletas foram direcionadas em três porções da planta: inferior (até 100 cm de altura), mediana (entre 101 e 200 cm de altura) e superior (a partir de 201 cm de altura).

Na safra 2018/2019, foram realizadas 10 coletas em intervalos semanais, com início em 8/01/2019 e término em 13/03/2019, nos dias 8, 15, 22, 30 de janeiro, 7, 13, 20, 27 de fevereiro e 8, 13 de março, sendo, respectivamente, 99, 106, 113, 121, 129, 135, 142, 149, 158 e 163 dias após a plena floração (DAPF), quando da completa maturação dos frutos. Foram coletados 30

frutos a cada semana de cada uma das três porções da planta. As maçãs foram acomodadas em caixas plásticas com dimensões de 36,0 × 55,0 × 30,5 cm, protegidas internamente por plástico polibolha, a fim de evitar danos mecânicos por impacto ou atrito durante o transporte.

No laboratório, os frutos foram numerados e identificados os lados com maior e menor intensidade de cor, que são, normalmente, os lados iluminado e sombreado do fruto, respectivamente. Cada um dos lados dos frutos foi avaliado quanto aos parâmetros I_{DA}, cor da casca, firmeza de polpa, teor de sólidos solúveis (SS) e acidez titulável (AT). O local exato de avaliação do I_{DA} foi identificado de forma que todas as outras determinações, com exceção da acidez titulável, pudessem ser realizadas no mesmo local (Figura 2).

A amostra para determinação do teor de sólidos solúveis foi retirada, com auxílio de uma pipeta Pasteur, do orifício deixado na polpa pela ponteira do penetrômetro. A acidez titulável foi determinada a partir do suco homogeneizado proveniente de 10 frutos, perfazendo três repetições de cada condição estudada.

Na safra 2019/2020, foram mantidas as mesmas filas e faces (interna e externa) de coleta, entretanto fo-

Figura 1. Localização da área de estudo no município de Vacaria-RS, nas dependências da Embrapa Uva e Vinho.

Figura 2. Numeração dos frutos e identificação dos lados sombreado e exposto à radiação solar para as análises não destrutiva e destrutivas.

ram efetuadas somente cinco coletas, com início em 10/02/2020 e término em 17/03/2020 (10, 17 de fevereiro e 2, 9, 17 de março, sendo, respectivamente 126, 133, 147, 154, e 162 DAPF). As amostras foram compostas por 20 frutos colhidos a esmo das porções inferior e mediana das plantas. Os frutos foram colhidos e acondicionados de maneira idêntica à do ano anterior a fim de protegê-los durante o transporte. Os procedimentos de identificação dos frutos e as determinações de I_{DA}, cor da casca, firmeza de polpa e teor de sólidos solúveis foram conduzidos conforme na safra anterior. A determinação da acidez titulável foi realizada a partir do suco homogeneizado de 10 frutos. Adicionalmente, foram avaliados o Índice de Regressão do Amido (IRA) e a cor da semente de cada fruto proveniente de cada uma das condições estudadas.

A avaliação não destrutiva do amadurecimento dos frutos, baseada no nível de clorofila na casca, foi realizada com auxílio do DA-Meter, equipamento desenvolvido e patenteado pela Universidade de Bologna (DA-Meter 53500, Turoni, Itália) (Figura 3).

A avaliação destrutiva dos atributos de qualidade foi realizada conforme os seguintes procedimentos: cor da casca (espaço de cores CIE LAB) determinada por colorímetro (CR 400, Konica Minolta); firmeza de polpa (N), com penetrômetro automatizado (GÜSS) com ponteira cilíndrica de 11 mm; sólidos solúveis - SS (°Brix), com refratômetro digital (H196801, Hanna Instruments); acidez titulável - AT (% ácido málico), por meio da titulação da solução composta por 10 mL de suco de maçã e 90 mL de água destilada com NaOH 0,1 N até pH 8,1, utilizando bureta digital (Digitrate Pro, VWR), e Índice de Regressão do Amido – IRA (1 a 5) por meio da imersão parcial da metade superior da maçã em solução de iodo, iodeto de potássio e água. O padrão de coloração obtido foi comparado a uma escala referência de imagens, na qual 1 representa o máximo conteúdo de amido e 5 indica a total hidrólise do amido. A cor da semente (1 a 4) foi avaliada por meio da avaliação visual, em que 1 representa as sementes imaturas (cor creme) e 4 indica as sementes maduras (cor marrom).

Os dados obtidos em cada uma das safras constituíram uma matriz numérica. Foram avaliados os seguintes parâmetros de coleta: linha do pomar (α e β), face da planta (interna e externa), altura de coleta dos frutos (inferior, mediana e superior), data de coleta (99, 106, 113, 121, 129, 135, 142, 149, 158 e 163 DAPF, para a safra 2018/2019, e 126, 133, 147, 154 e 162 DAPF, para a safra 2019/2020) e lado do fruto (exposto à radiação solar e sombreado). Cada matriz numérica foi submetida a análise multivariada e análise de variância. A modelagem de regressão multivariada foi empregada a fim de predizer os principais atributos de qualidade obtidos por técnicas destrutivas a partir de técnicas não destrutivas, como o $I_{DA.}$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conjunto de parâmetros de coleta estudado revelou que somente a data de coleta (DAPF) e a face do fruto interferiram nos atributos de qualidade de maçãs 'Fuji Suprema', confirmando-os como parâmetros a serem considerados nos estudos de monitoramento da evolução da maturação para fins de estimativa do início da colheita. A altura de coleta e a face da planta não foram relevantes na discriminação das amostras neste estudo, o que pode reduzir a exigência de direcionamento na coleta de dados e facilitar a amostragem dos frutos.

Figura 3. DA-Meter, espectrômetro portátil que mede a clorofila 'a' na casca e na polpa do fruto, e fornece um índice de diferença entre as absorbâncias (I_{DA}) obtidas a 670 nm e a 720 nm.

Nas condições do Rio Grande do Sul, a floração da 'Fuji Suprema' sobre o porta-enxerto M-9 ocorre normalmente a partir da segunda quinzena de setembro e se estende até a primeira quinzena de outubro; a maturação dos frutos ocorre entre meados de março e final de abril, e o desenvolvimento dos frutos se dá nos meses intermediários aos dois estágios fenológicos (Fioravanço et al., 2010). Nas safras estudadas, a plena floração foi observada na primeira semana de outubro e o estádio de maturação comercial foi atingido em 13/03/2019, aos 163 DAPF (safra 2018/19), e 17/03/2020, aos 162 DAPF (safra 2019/20). Essas datas referem-se às últimas coletas, mostrando que tais estágios fenológicos ocorreram conforme o esperado para a cultivar e a região de produção.

Com base na distribuição das coletas, pode-se inferir que o melhor momento para o início do monitoramento da evolução da maturação é entre 142 e 147 DAPF, quando se observa que os processos metabólicos relacionados à maturação e ao amadurecimento se intensificam. A partir desse período, nota-se que alguns atributos apresentam drástica mudança após um período de estabilidade (cromaticidade da casca), ao passo que outros atributos, como o teor de sólidos solúveis, apresentam mudanças mais gradativas.

Considerando o período sugerido para início do monitoramento (142-147 DAPF), espera-se que o I_{DA} de aproximadamente 1,50 atinja valores próximos de 1,25 na data de colheita, que a firmeza de polpa passe de cerca 95 N para 83 N, que o teor de SS de 13° Brix atinja cerca de 15,8 °Brix e que a cromaticidade da casca passe de valores aproximados de 28 para valores de 31. Ainda, é de se esperar que, nesse período, as sementes já se encontrem completamente marrons e que os frutos atinjam valores de IRA superiores a 3 somente na colheita comercial (162 DAPF). A homogeneidade na evolução da maturação, principalmente nas últimas três coletas, ou seja, quando os frutos estão se aproximando da maturidade comercial, é um indicativo da possibilidade de se realizar apenas uma colheita, sem que haja a necessidade de repasses na mesma área de produção.

Não há um consenso, nos estudos publicados, quanto ao lado do fruto (exposto ou sombreado) que deve ser amostrado em maçãs. A maioria deles utiliza um valor médio obtido a partir da amostragem dos frutos em dois pontos equidistantes na região equatorial, o que pode não representar adequadamente nenhum dos lados amostrados. Os resultados obtidos neste estudo sugerem que a amostragem das maçãs e a obtenção do I_{DA} sejam padronizadas, preferencialmente, na face exposta do fruto, uma vez que a tecnologia de monitoramento proximal poderá, num futuro próximo, estar embarcada em sistemas mais robustos, de forma a efetuarem a coleta dos dados ao passarem pelas linhas de cultivo. Ainda, é importante salientar que os resultados obtidos neste estudo se destinam à predição da colheita de maçãs 'Fuji Suprema' não tratadas em pré-colheita com reguladores vegetais que inibem a produção de etileno (ReTain® e Harvista™), uma vez que estes produtos interferem na correlação entre o I_{DA} e os índices de colheita.

Uma vez obtidos os valores médios para a maçã cv. 'Fuji Suprema' nas condições do Rio Grande do Sul, será possível agregar os valores obtidos em campo com as coordenadas obtidas por GPS (*Global Positioning System*, em inglês, ou Sistema de Posicionamento Global) e gerar mapas de acompanhamento da maturação e previsão de colheita para a safra corrente, permitindo a gestão da logística de colheita, ou seja, o planejamento da quantidade de frutos para comercialização imediata e daquela a ser armazenada, a gestão de maquinário e de mão de obra para colheita, e as atividades no *packing house*. Trabalhos futuros com este equipamento podem envolver novas cultivares de maçã na avaliação da variabilidade espacial dentro da safra e aquisição de bases de dados ao longo de várias safras consecutivas, de forma a se proporem modelos matemáticos que façam a predição de safras futuras considerando a variabilidade temporal da cultura.

4 CONCLUSÕES

1. O DA-Meter pode ser empregado no monitoramento da evolução da maturação de maçãs 'Fuji Suprema' cultivadas nas condições climáticas do Rio Grande do Sul para fins de determinação do início da colheita.
2. O monitoramento da evolução da maturação com o DA-Meter deve se iniciar entre 142 e 147 DAPF, sendo as leituras obtidas no lado exposto do fruto.
3. As correlações entre I_{DA} e firmeza de polpa, e entre I_{DA} e sólidos solúveis permitem a substituição dessas avaliações destrutivas comumente empregadas para avaliação da maturação de maçãs pelo I_{DA}.
4. O uso do DA-Meter pode ser vinculado ao uso de coordenadas de coleta de dados no pomar, permitindo a geração de mapas da variabilidade espacial e temporal sobre a previsão e a qualidade do fruto semanas antes da colheita, auxiliando na tomada de decisão do manejo do pomar.

AGRADECIMENTOS

À rede de Agricultura de Precisão da Embrapa. Ao projeto SEG 11.14.09.001.02.00 - Convertido de: Tecnologias Habilitadoras 2 para Automação e AP: fruticultura e cafeicultura.

REFERÊNCIAS

COSTA, G.; ROCCHI, L.; FARNETI, B.; BUSATTO, N.; SPINELLI, F.; VIDONI, S. Use of nondestructive devices to support pre and postharvest fruit management. **Horticulturae**, v. *3*, n. 1, p. 12, 2017. DOI: http://doi.org/10.3390/horticulturae3010012.

COSTAMAGNA, F.; GIORDANI, L.; COSTA, G.; NOFERINI, M.Use of AD index to define harvest time and characterize ripening variability at harvest in 'Gala' apple. **Acta Horticulturae**, n. 998, p. 117-123, 2013. DOI: http://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.998.12.

DELONG, J. M.; HARRISON, P. A.; HARKNESS, L. Determination of optimal harvest boundaries for 'Ambrosia' apple fruit using a delta-absorbance meter. **The Journal of Horticultural Science & Biotechnology**, v. *91*, n. 3, p. 243-249, 2016. DOI: http://doi.org/10.1080/14620316.2016.1148369.

DELONG, J.; HARRISON, P.; HARKNESS, L. An optimal harvest maturity model for 'Minneiska' apple fruit based on the delta-absorbance meter. **The Journal of Horticultural Science & Biotechnology**, v. *95*, n. 5, p. 637-644, 2020. DOI: http://doi.org/10.1080/14620316.2020.1728199.

DELONG, J.; PRANGE, R.; HARRISON, P.; NICHOLS, D.; WRIGHT, H. Determination of optimal harvest boundaries for Honeycrisp™ fruit using a new chlorophyll meter. **Canadian Journal of Plant Science**, v. *94*, n. 2, p. 361-369, 2014. DOI: http://doi.org/10.4141/cjps2013-241.

FIORAVANÇO, J. C.; Girardi, C. L.; Czermainski, A. B. C.; SILVA, G. A.; Nachtigall, G. R.; OLIVEIRA, P. R. D. **Cultura da macieira no Rio Grande do Sul:** análise situacional e descrição varietal. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2010. 60 p. (Embrapa Uva e Vinho. Documentos, 71).

LI, B.; LECOURT, J.; BISHOP, G. Advances in non-destructive early assessment of fruit ripeness towards defining optimal time of harvest and yield prediction – a review. **Plants**, v. *7*, n. 1, p. 3, 2018. DOI: http://doi.org/10.3390/plants7010003.

MAGRO, M.; SANDER, G. F.; DOS SANTOS, A. M.; RUFATO, L.; RUFATO, A. R.; KRETZSCHMAR, A. A.; ROBINSON, T. L. Monitoring maturation evolution of 'Maxi Gala' apples by a non-destructive fruit analysis method. **Acta Horticulturae**, n. 1228, p. 235-240, 2018. DOI: http://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1228.35.

NYASORDZI, J.; FRIEDMAN, H.; SCHMILOVITCH, Z.; IGNAT, T.; WEKSLER, A.; ROT, I.; LURIE, S. Utilizing the IAD index to determine internal quality attributes of apples at harvest and after storage. **Postharvest Biology and Technology**, v. *77*, p. 80-86, 2013. DOI: http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.11.002.

REIG, G.; ALEGRE, S.; IGLESIAS, I.; ECHEVERRÍA, G.; GATIUS, F. Fruit quality, colour development and Index of absorbance difference (IAD) of different nectarine cultivars at different harvest dates. **Acta Horticulturae**, n. 934, p. 1117-1126, 2012. DOI: http://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.934.150.

TOIVONEN, P. M. A.; HAMPSON, C. R. Relationship of IAD index to internal quality attributes of apples treated with 1-methylcyclopropene and stored in air or controlled atmospheres. **Postharvest Biology and Technology**, v. *91*, p. 90-95, 2014. DOI: http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.12.024.

ZIOSI, V.; NOFERINI, M.; FIORI, G.; TADIELLO, A.; TRAINOTTI, L.; CASADORO, G.; COSTA, G. A new index based on vis spectroscopy to characterize the progression of ripening in peach fruit. **Postharvest Biology and Technology**, v. *49*, n. 3, p. 319-329, 2008. DOI: http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.01.017.

55

Reflectância de macieiras a pleno sol e sob dois tipos de tela antigranizo: considerações para o sensoriamento remoto proximal

Reflectance of apple trees in full sun and under two types of anti-hail screen: considerations for proximal remote sensing

Andrea De Rossi[1], Lúcio de Paula Amaral[2], Luciano Gebler[3]

[1] *Engenheira Agrônoma, Pesquisadora, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, andrea.derossi@embrapa.br*

[2] *Engenheiro Florestal, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Campus Sede, Santa Maria (RS), Centro de Ciências Rurais, Departamento de Engenharia Rural, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal – Campus Santa Maria,Santa Maria (RS), Brasil, lucio.amaral@ufsm.br*

[3] *Engenheiro Agrônomo, Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br*

RESUMO

O risco de chuvas de granizo levou à adoção massiva de cobertura dos pomares de macieira com tela antigranizo, criando um novo microclima em termos de radiação solar e temperatura do ar. Na agricultura de precisão, técnicas de monitoramento e diagnóstico através do estudo de suas características espectrais só foram calibradas para culturas a pleno sol. Sabe-se que a presença da tela antigranizo provoca diferenças na quantidade e qualidade da energia luminosa disponível às plantas, porém falta saber qual a dimensão dessas variações e se as variações de reflectância e radiação fotossinteticamente ativa irão modificar os métodos empregados no sensoriamento remoto proximal ou impedirão o seu emprego. O objetivo desta pesquisa foi quantificar e avaliar a reflectância em pomares de macieiras 'Maxi Gala' cobertos com tela antigranizo de coloração branca e pérola, comparando-os com cultivo a pleno sol, usando a técnica de espectrorradiometria como ferramenta de coleta dos dados. A calibração do sensoriamento proximal para ambientes protegidos permite aumentar a sensibilidade das respostas na medição da reflectância e da radiação fotossinteticamente ativa para geração de zonas de manejo, no estudo da variabilidade espacial de pomares de macieira.

Palavras-chave: cobertura de pomares; radiação solar; espectrorradiometria.

ABSTRACT

Risk of hailstorms has led to the wide-spread practice of covering apple orchards with anti-hail netting, creating a new microclimate in terms of solar radiation and air temperature. In precision agriculture, monitoring and diagnostic techniques through studying spectral characteristics have only been calibrated for crops under full sun. It is known that the presence of anti-hail screens causes differences in the quantity and quality of light energy available for plants. However, the magnitude of these variations and whether variability in reflectance and photosynthetically active radiation affects the methods employed in proximal remote sensing or prevents their application, remains unknown. This study seeks to quantify and evaluate the reflectance in 'Maxi Gala' apple orchards covered with white and pearl anti-hail netting, comparing them with full sun cultivation, using the spectroradiometry technique as a data collection tool.

Keywords: pearl anti-hail net; white anti-hail net; solar radiation; spectroradiometry.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000029

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a fruticultura de precisão busca adequar ferramentas que auxiliem na identificação de áreas com potencial para produção de frutos de melhor qualidade ou no entendimento dos fatores inerentes à mesma, e que possam reduzir a necessidade de mão de obra. Neste sentido, o sensoriamento remoto pode ser uma das ferramentas aplicadas à fruticultura de precisão, à medida que possibilita, juntamente com o georreferenciamento, a obtenção de mapas de variabilidade espacial e temporal da reflectância do dossel.

Técnicas para o monitoramento e diagnóstico de cultivos agrícolas que estão em pleno desenvolvimento possibilitam determinar o vigor vegetativo e as diferenças entre espécies de plantas através do estudo de suas características espectrais (Bombassaro, 2016). A energia proveniente do sol (radiação eletromagnética) ou de sistemas ativos tem sido um dos temas de interesse, pois, quando atinge e interage com um objeto, tende a ser fracionada em energia absorvida, refletida e transmitida, sendo importante a compreensão da forma e da qualidade da energia resultante. Estas interações, quando aplicadas à vegetação, podem ser estimadas por modelos de reflectância, pois estes procuram estabelecer uma conexão lógica entre os parâmetros biofísicos da vegetação e as suas propriedades espectrais (Formaggio; Sanches, 2017).

Dos 50% do total de energia solar que incide na planta, parte é absorvida pelos pigmentos contidos na folha, os quais participam da síntese de metabólitos pela fotossíntese; outra fração altera estruturas moleculares (fotoconversão), e uma terceira parte acelera reações, como a foto-oxidação das xantofilas (Moreira, 2011). Dos 50% restantes, parte é refletida pelas folhas enquanto outra é transmitida através do dossel. Quanto maior a quantidade de folhas presentes no dossel, maior a reflectância da vegetação, devido ao efeito de espalhamento múltiplo entre as camadas (Belward, 1991). À medida que ocorre o aumento do espalhamento do fluxo, ocorre a diminuição da reflectância no visível e no infravermelho médio, e um aumento no infravermelho próximo (Ponzoni; Shimabukuro, 2007).

A tela antigranizo é usada na maioria dos novos pomares implantados nas regiões produtoras de maçãs no Brasil. Com avanço do desenvolvimento dessa tecnologia, passou-se da tela antigranizo de coloração preta para telas de outras colorações, como branco, vermelho e amarelo, e, mais recentemente, para tela de coloração pérola. Os trabalhos desenvolvidos até então buscaram comparar colorações de telas branca e preta (Amarante et al., 2007, 2009), e também de outras colorações (Vilvert et al., 2018). Parâmetros, como quantidade e qualidade da radiação solar, fotossíntese, rendimento e qualidade de frutos, foram discutidos nesses trabalhos.

O objetivo do presente estudo foi quantificar e avaliar a reflectância em pomar de macieiras 'Maxi Gala' coberto com tela antigranizo de coloração branca e pérola, comparando-a com a reflectância observada no cultivo a pleno sol, usando a técnica de espectrorradiometria como ferramenta de coleta de dados georreferenciados como prática da fruticultura de precisão.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O experimento foi realizado em pomar comercial de macieiras 'Maxi Gala', da empresa Agroindustrial São Pedro Ltda., localizado no município de Bom Jesus-RS, na região fisiográfica dos Campos de Cima da Serra, com coordenadas -28,600368°S e -50,497291°O e altitude aproximada de 1.030 m (Figura 1), com três manejos, sendo cultivo em pleno sol ou fora da tela (FT), cobertura com tela antigranizo de coloração branca (TB) e de coloração pérola (TP).

A classe predominante de solo na área de estudo é Cambissolo Húmico Alumínico típico – CHa1 (Streck et al., 2008). O clima é do tipo Cfb, sendo clima temperado quente (Wrege et al., 2012).

2.2 Coleta e análise dos dados de reflectância

A coleta de dados de reflectância foi realizada em dezembro de 2019, com espectrorradiômetro portátil FieldSpec Hand Held 2 VNIR ASD, resolução espectral de 325-1.075 nm e intervalo de 1 nm, em blocos de 50 leituras por planta a cada cinco macieiras adultas (≈14 anos), tendo cinco valores médios de reflectância. As leituras foram nas alturas de 1, 2 e 4 m ao longo da copa, em plantas no centro da linha de plantio em relação à gleba, submetidas aos três manejos considerados. A calibração do equipamento foi realizada com placa de calibração para refletância, que representa uma superfície lambertiana. Os horários das medições em campo variaram entre 11 e 13 horas, período de menor ângulo de inclinação solar e maior fluxo de energia radiante, com condições meteorológicas adequadas (céu predominantemente livre de nuvens e pouco vento), com calibrações periódicas. Os dados foram descarregados com o *software* ViewSpecPro ASD, as curvas de reflectância foram geradas com o *software* HH2 Sync ASD, e os dados foram exportados para planilha eletrônica. As análises es-

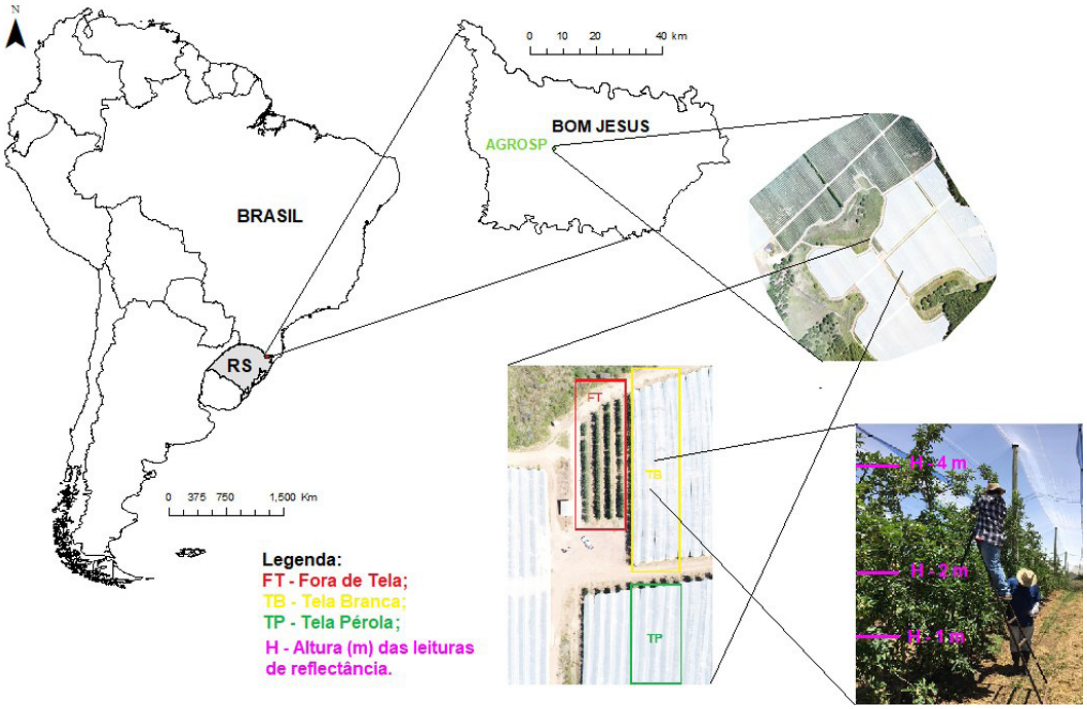
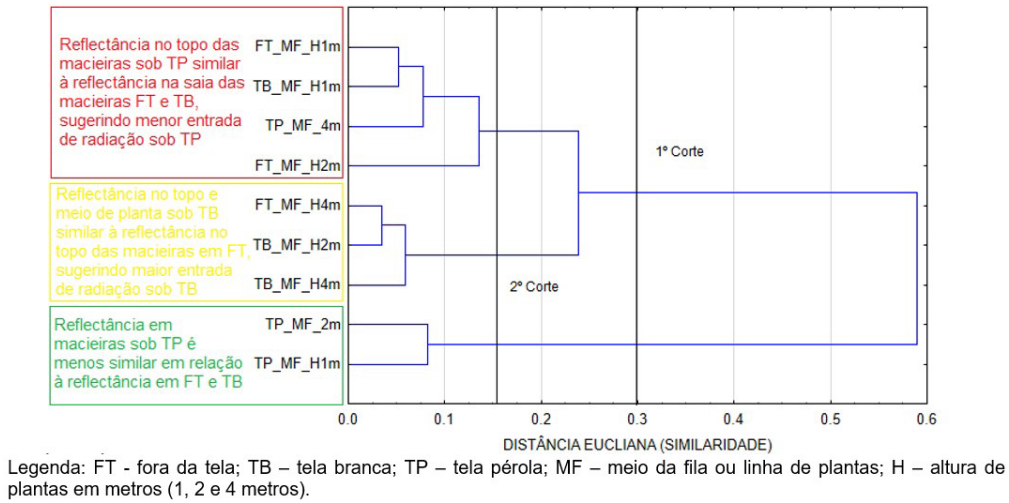


Figura 1. Localização da área de estudo em pomar comercial de macieiras da AGROSPE, Bom Jesus- RS, Brasil.



Legenda: FT - fora da tela; TB – tela branca; TP – tela pérola; MF – meio da fila ou linha de plantas; H – altura de plantas em metros (1, 2 e 4 metros).

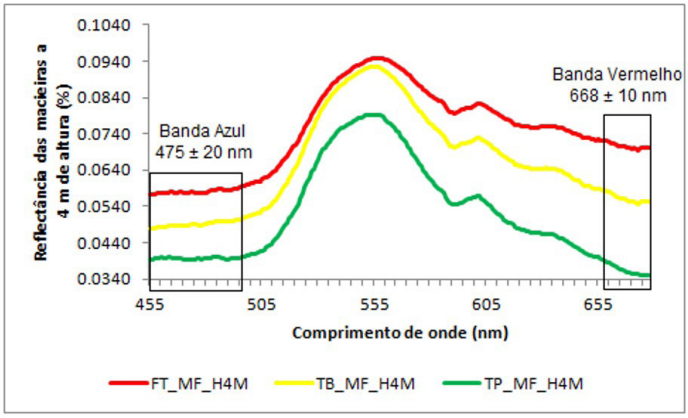
Figura 2. Análise de cluster para medidas de refletância em macieiras sob tela antigranizo de coloração branca e pérola, e fora de tela, em pomar comercial da AGROSPE, Bom Jesus-RS.

tatísticas realizadas foram análise de agrupamento hierárquico – cluster e análise de variância (ANOVA).

Para a análise de cluster, os dados foram sistematizados com referência às bandas espectrais do sensor RedEdge-Mx (azul 475 ±20 nm, verde 560 ±20 nm, vermelho 668 ±10 nm, infravermelho próximo ±40 nm e vermelho limítrofe 717 ±10 nm). Nesta análise, foi utilizada a ligação dos objetos (médias de reflectância nas bandas de referência) pelo método Ward e a distância euclidiana, como medida de similaridade para a formação dos agrupamentos (Vicini et al., 2018). Para a realização da ANOVA e do teste de Tukey (p=0,005), os dados de reflectância foram sistematizados em duas bandas espectrais, azul (475 ±20 nm) e vermelho (668 ±10 nm), que correspondem aos comprimentos de onda nos quais há maior atividade das clorofilas *a* e *b*. Foi utilizado o *software* SigmaPlot para a análise e o *software* Statistica para a geração dos gráficos de colunas.

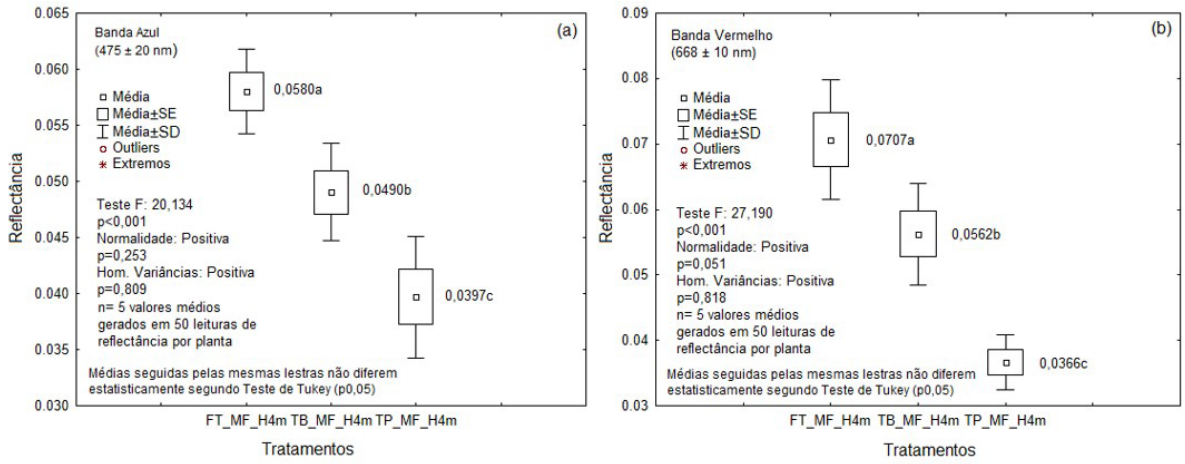
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados de reflectância obtidos nas macieiras e sistematizados pelas bandas de referência, quando



Legenda: FT - fora da tela; TB – tela branca; TP – tela pérola; MF – meio da fila ou linha de plantas.

Figura 3. Reflectância média na região do visível (destaque para as bandas azul e vermelho), em macieiras sob tela antigranizo de coloração branca e pérola, e fora de tela, em pomar comercial da AGROSPE, Bom Jesus-RS.



Legenda: FT - fora da tela; TB – tela branca; TP – tela pérola; MF – meio da fila ou linha de plantas; H – altura de plantas em metros (4 metros); Hom. – homogeneidade.

Figura 4. ANOVA para reflectância de macieiras sob tela antigranizo de coloração branca e pérola, e fora de tela, na altura de 4 m acima do nível do solo, em pomar comercial da AGROSPE, Bom Jesus-RS.

analisados pela análise de cluster e pelos agrupamentos formados, apresentaram diferenças de similaridade entre si (Figura 2). Estes sugerem que, no cultivo sob TP, ocorre menor incidência de radiação sobre as folhas, pois, sob TB, a reflectância das macieiras foi similar com a observada em plantas FT, em que há maior incidência por não haver interceptação da radiação sobre o dossel.

Na ANOVA, a reflectância apresentou diferenças significativas entre os manejos na região do visível (Figura 3), especificamente nas bandas do azul e do vermelho (Figura 4). Com isso, a TP tem a vantagem de diminuir problemas de queimadura de sol nos frutos (golpe de sol), mas é necessário entender quais são as implicações no desenvolvimento das plantas, na produção e qualidade de frutos, e as possibilidades de gerar novas configurações de manejo.

4 CONCLUSÃO

A reflectância de macieiras, na parte superior da copa – 4 m altura –, sob tela antigranizo pérola, foi a mais discrepante e apresentou menores valores quando comparada com a verificada nas macieiras sob tela antigranizo branca e fora de tela. A tela antigranizo pérola reflete mais radiação em relação à tela branca, devido à menor entrada de energia no dossel do pomar sob esta condição.

A refletância em macieiras sob tela antigranizo branca foi mais similar à do ambiente aberto em relação à tela pérola. As diferenças de refletância de macieiras foram significativas nas bandas do azul (475 ±20 nm) e do vermelho (668 ±10 nm), utilizadas pelas plantas na fotossíntese.

A calibração do sensoriamento proximal para ambientes protegidos permite aumentar a sensibilidade das respostas na medição da reflectância e da radia-

ção fotossinteticamente ativa para geração de zonas de manejo, no estudo da variabilidade espacial de pomares de macieira.

AGRADECIMENTOS

À AGROSPE, por nos apresentar sua demanda de pesquisa sobre telados de macieiras, pela disponibilidade de seus pomares e pelos apoios logísticos. Ao Colégio Politécnico da UFSM e ao PPGAP/UFSM, pelo apoio à realização deste trabalho, pela disponibilidade do espectrorradiômetro para a coleta de dados e pela contribuição do Projeto 048066 – Uso de Geotecnologias em Floresta de Precisão, Agricultura de Precisão, Novas Áreas de Precisão e Análises Espaciais, que viabilizou a participação do Prof. Lúcio Amaral.

REFERÊNCIAS

AMARANTE, C. V. T.; STEFFENS, C. A.; MIQUELOTO, A.; ZANARDI, O. Z.; SANTOS, E. P. Disponibilidade de luz em macieiras'fuji' cobertas com telas antigranizo e seus efeitos sobre a fotossíntese, o rendimento e a qualidade dos frutos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. *31*, n. 3, p. 664-670, 2009. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-29452009000300007.

AMARANTE, C. V. T.; STEFFENS, C. A.; MOTA, C. S.; SANTOS, H. P. Radiação, fotossíntese, rendimento e qualidade de frutos em macieiras 'Royal Gala' cobertas com telas antigranizo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. *42*, n. 7, p. 925-931, 2007. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000700003.

BELWARD, A. S. Spectral characteristics of vegetation, soil and water in the visible, near-infrared and middle-infrared wavelengths. In: BELWARD, A. S.; VALENZUELA, C. R. (Eds.). **Remote sensing and geographical information systems for resource management in developing countries**. Amsterdã: Springer Netherlands, 1991. p. 31-53. DOI: http://doi.org/10.1007/978-94-017-2879-9_3.

BOMBASSARO, M. G. **Análise espectral de variedades de *Vitis vinifera* a partir de dados radiométricos de dossel em vinhedos de Pinto Bandeira, RS**. 2016, Tese (Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. A. **Sensoriamento remoto em agricultura**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto**. 4. ed. Viçosa: Editora UFV, 2011. 422 p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação.** São José dos Campos: Editora Parêntese, 2007. 127 p.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/ASCAR, 2008. 222 p.

VICINI, L.; SOUZA, A. M.; MORALES, F. E. C.; SOUZA, F. M. **Técnicas multivariadas exploratórias:** *teoria e aplicações no software statistica.* Santa Maria: Editora UFSM, 2018. 240 p. DOI: http://doi.org/10.32379/9788573913231.

VILVERT, J. C.; FREITAS, S. T.; LOPES, P. R. C. Qualidade de maçãs 'Eva' cultivadas em diferentes regiões do Brasil. In: I CONGRESSO NACIONAL INTERDISCIPLINAR DO VALE DO SÃO FRANCISCO, 2018, Petrolina. **Anais** [...]. Petrolina: UNIVASF, 2018.

WREGE, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER JUNIOR, C.; ALMEIDA, I. R. de. **Atlas Climático da Região Sul do Brasil***: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. 2.* ed. Brasília, DF: Embrapa, 2012. 334 p.

Algoritmo para a implantação de zonas de manejo em fruticultura de precisão na cultura da maçã

56

Algorithm for setting up management zones in Precision Fruit Growing in the apple crop

Luciano Gebler [1], Andrea De Rossi[2], Silvio André Meirelles Alves[3], Regis Sivori Silva dos Santos[4]

[1] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br*
[2] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, andrea.derossi@embrapa.br*
[3] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, silvio.alves@embrapa.br*
[4] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, regis.sivori@embrapa.br*

RESUMO

Uma das principais causas da demora do avanço da adoção da fruticultura de precisão está na dificuldade da definição de zonas de manejo que representem o que ocorre na realidade de um pomar. Isso se deve à perda da representatividade do fator fertilidade do solo em relação à produtividade e à qualidade dos frutos à medida que o pomar avança em idade após atingir a fase produtiva, seja devido ao envelhecimento da planta, ao aumento da antropização, volume radicular ou acúmulo de reservas ao longo do tempo, necessitando de outras formas para representar a variabilidade do ambiente para seu manejo. Para auxiliar os produtores e técnicos, foi proposto um algoritmo simplificado que permite que o usuário construa as zonas de manejo sobre as quais o tomador de decisão irá aplicar as melhores práticas de manejo facilitando o processo de implantação da fruticultura de precisão em pomares de maçã.

Palavras-chave: planejamento do pomar; controle de manejo; fitotecnia.

ABSTRACT

One of the main causes of the delay in the adoption of precision fruit growing is the difficulty in defining management zones that represent what happens in the reality of an orchard. This is due to the loss of representation of the soil fertility factor in relation to productivity and fruit quality as the orchard advances in age after reaching the productive phase, whether due to the aging of the plant, increased anthropization, root volume or accumulation of reserves over time, requiring other ways to represent the variability of the environment for its management. To assist producers and technicians, a simplified algorithm has been proposed that allows the user to construct management zones on which the decision maker will apply the best management practices, facilitating the process of implementing precision fruit growing in apple orchards.

Keywords: orchard planning; management control; plant science.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão só existe quando há variabilidade espacial ou temporal que justifique o planejamento e manejo do ambiente de forma especializada. Por outro lado, muitas vezes as características locais são tão variadas que produzem mapas com zonas homogêneas muito pequenas, dificultando ações corretivas de manejo nesse ambiente. Assim, pode-se ajustar um mapa ao aceitar a união de zonas com graus de variabilidade mais próximas, agrupando-as em manchas maiores, possíveis de serem trabalhadas segundo os equipamentos ou maquinário disponível (Figura 1).

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000030

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

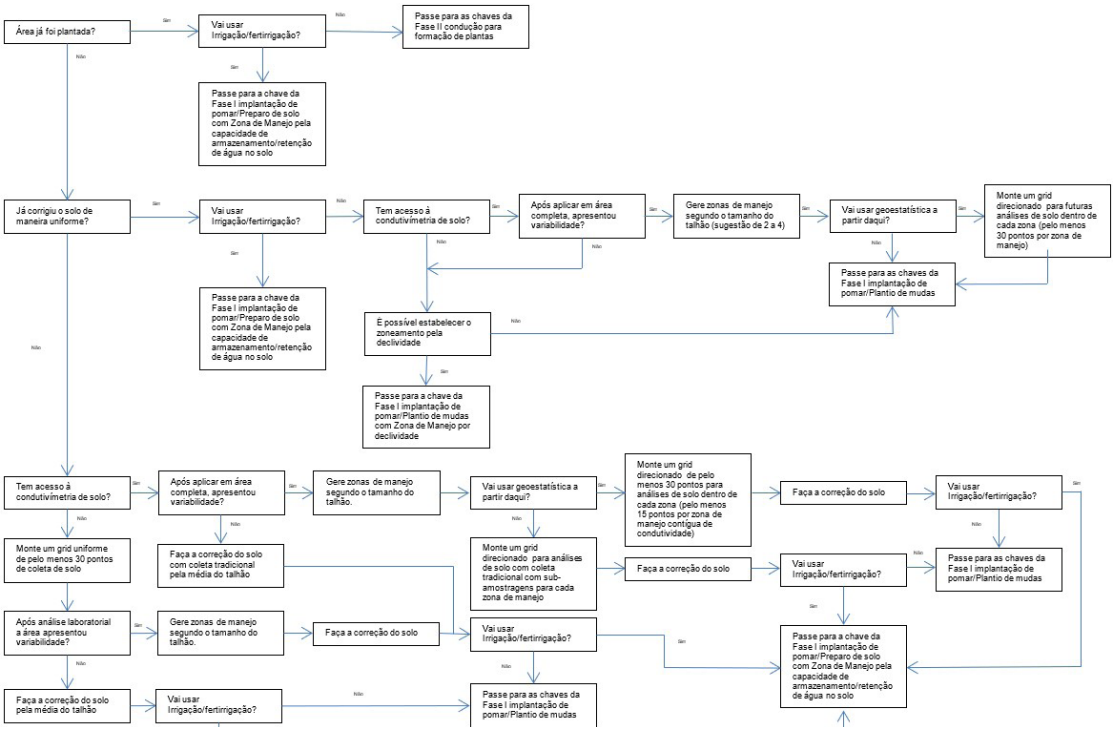


Figura 1. Mapas da mesma área e representação com variação no dimensionamento das zonas de manejo pela alteração dos limites de valor dos parâmetros.

No atual estágio tecnológico da agricultura de precisão, a principal forma de executar essa correção é a utilização dessas zonas de manejo, aceitando a existência de pequenos erros ou desvios por conta da existência de pequenos graus de variabilidade, mas que são reconhecidas como zonas mais homogêneas internamente do que em relação às zonas formadas na vizinhança, com os limites de erros de variabilidade maiores entre si. Além disso, para o sucesso de um programa de implantação de agricultura de precisão, independentemente da cultura que está sendo trabalhada, é necessário que haja um conjunto mínimo de informações qualificadas para que o sistema funcione, gerando a necessidade da criação de bancos de dados locais.

Portanto, todo sistema envolvendo a AP deve prever a coleta de dados e geração de informações (Etapa 1), para que o tomador de decisões possa propor uma ação corretiva em algum aspecto do ambiente produtivo (Etapa 2), sendo necessário que ao final do ciclo possa ser verificado o sucesso dessa correção (Etapa 3), a fim de propor a repetição, o avanço ou mesmo a paralisação do processo (Etapa 4), fechando um ciclo contínuo de trabalho. O exemplo tradicional de uma rodada de AP seria a obtenção dos mapas de fertilidade do solo de uma área (Etapa 1), execução das correções de fertilidade, quando necessário (Etapa 2), e a obtenção do mapa de colheita (Etapa 3), verificando-se se houve sucesso na tomada de decisão, gerando uma relação causa-efeito. Com a recorrência desta ação ao longo dos anos, também torna possível a comparação entre os conjuntos anuais de mapas, contendo os ajustes da variabilidade espacial, permitindo avaliar o efeito da variabilidade temporal, necessário quando se envolve a análise de culturas perenes, bastante comum na aplicação de fruticultura de precisão (Figura 2).

Por ser uma planta perene, essas dificuldades na definição de zonas de manejo também ocorrem na cultura da macieira. A experiência tem demonstrado que nas etapas de implantação do pomar, durante a fase de condução (plantio das mudas e sua estruturação), enquanto o pomar é dedicado ao crescimento das plantas, o manejo da fertilidade e da água é a ferramenta mais eficaz que impacta na resposta das plantas. Entretanto, a partir da fase produtiva, a fertilidade do solo rapidamente vai perdendo importância, a ponto de que, em poucas safras, o mapa de fertilidade de solo não apresenta mais relação com o mapa de produtividade do pomar (Childers et al., 1995; Gebler et al., 2015). A explicação para isso é de natureza complexa, porém de compreensão simples. À medida que a planta vai ampliando seu horizonte de raízes, e as reservas vão sendo acumuladas em suas partes vegetativas, as plantas adultas dependem cada vez menos da fertilidade do solo, chegando mesmo a apresentar resiliência a períodos curtos de seca ou à falta de adubação em anos

Figura 2. Ciclo de operação para a fruticultura de precisão.

alternados, estabelecendo uma relação causa-efeito entre outros parâmetros fitotécnicos/fisiológicos com a produção/qualidade, passando estes a representar bases melhores para a tomada de decisão (Ferree; Schupp, 2003).

Portanto, à medida que o pomar vai avançando em idade, começa a haver a especialização das demandas das plantas segundo a finalidade da produção, ou seja, culturas perenes cujo objetivo é produção de massa ou volume ainda respondem relativamente bem à extração de nutrientes do solo, enquanto que as culturas voltadas ao consumo in natura, ou com a produção focada na qualidade, demandam outros parâmetros que não a fertilidade do solo. No primeiro caso, a remuneração é feita pela média em valores mais baixos, sendo que o produtor ganha no aumento do volume, enquanto que no segundo caso, também chamada de produção premium, a remuneração é pela percepção da "perfeição" do produto, ou seja, pela qualidade, atingindo picos de remuneração unitária que faz valer a pena diminuir o volume da produção e se dedicar à expressão máxima das características únicas do produto (Bazzi et al., 2022). Resumindo, culturas perenes para industrialização massiva, como suco, café commodities ou vinho de mesa, remuneram pelo volume de produto enquanto que o "consumo premium", como frutas in natura, café gourmet ou vinhos finos, remuneram pela unidade de produto de altíssima qualidade.

Logo, a produção industrial necessita de volume, e este fator é gerado pela extração máxima dos fatores que permitem a produção do ambiente, como nutrientes, água e energia, enquanto a produção premium necessita de expressão pronunciada de características diferenciais de cada planta, sendo regrada pela junção da resposta fisiológica do indivíduo às características do ambiente onde a mesma se encontra. Sendo assim, as culturas perenes destinadas à industrialização tendem a se comportar mais como culturas anuais na demanda por insumo, enquanto as de destinação para consumo in natura ou premium exigem um manejo fortemente baseado na resposta fisiológica das plantas.

Levando em consideração todos esses aspectos elencados para o trabalho em fruticultura de precisão, verificou-se que o ponto crucial para o início do processo é o apoio aos usuários para a geração de zonas de manejo que tenham ressonância com a realidade na produção de maçãs. Na busca por alternativas práticas e diretamente aplicáveis ao campo, planejou-se a criação de um roteiro para a instalação de zonas de manejo levando em conta as diferentes necessidades apresentadas na fruticultura perene, permitindo a intercambialidade e replicabilidade nos mais diferentes ambientes produtivos. A proposta é a criação de um roteiro na forma de um algoritmo, aproveitando também que pode haver a entrada de dados de vários tipos

(fisiologia da planta, manejo pelo ser humano, fertilidade do solo, disponibilidade de água, micro e macroclima, dentre outros).

Um algoritmo é a adoção de uma série de passos lógicos que partem de um problema e buscam chegar a uma solução, ou seja, o encadeamento de ações necessárias ao cumprimento de uma tarefa (Manzano; Oliveira, 2019). Dificilmente haverá somente uma solução para um problema, portanto o que o uso do algoritmo propõe é a oportunidade de otimizar uma determinada solução, obtendo-se a forma mais direta e rápida possível. O algoritmo elaborado neste trabalho foi feito com base na avaliação ex-ante e ex-post de especialistas de cada área-chave, buscando facilitar ao usuário a geração de zonas de manejo que atendam a fase inicial do trabalho de implantação da fruticultura de precisão em uma área, sem avançar sobre a responsabilidade de apresentar as soluções técnicas necessárias a cada caso a serem apresentadas ao tomador de decisão.

2 UTILIZANDO O ALGORITMO

Foram criados roteiros binários simplificados, orientando o usuário para que ele disponha de informações, as mínimas necessárias, para construir uma zona de manejo orientada para a especialidade que ele escolheu iniciar a análise. Pode acontecer de a análise envolver mais de uma especialidade, envolvendo mais de um fluxograma analítico. Outra opção é o usuário desenvolver um conjunto de mapas com diferentes zonas de manejo, sendo um para cada especialidade analisada para a área de produção.

O algoritmo foi dividido nas seguintes especialidades para geração de zonas de manejo, conforme o Quadro 1:

O algoritmo pode ser utilizado na forma gráfica, aqui apresentada, ou por meio de um software a ser desenvolvido. Na forma gráfica, o usuário deverá iniciar sempre pelo questionamento no lado superior esquerdo e ir seguindo as indicações, à medida que responda "sim" ou "não", podendo chegar a uma das seguintes classes de resultados:

a) É possível gerar zonas de manejo;

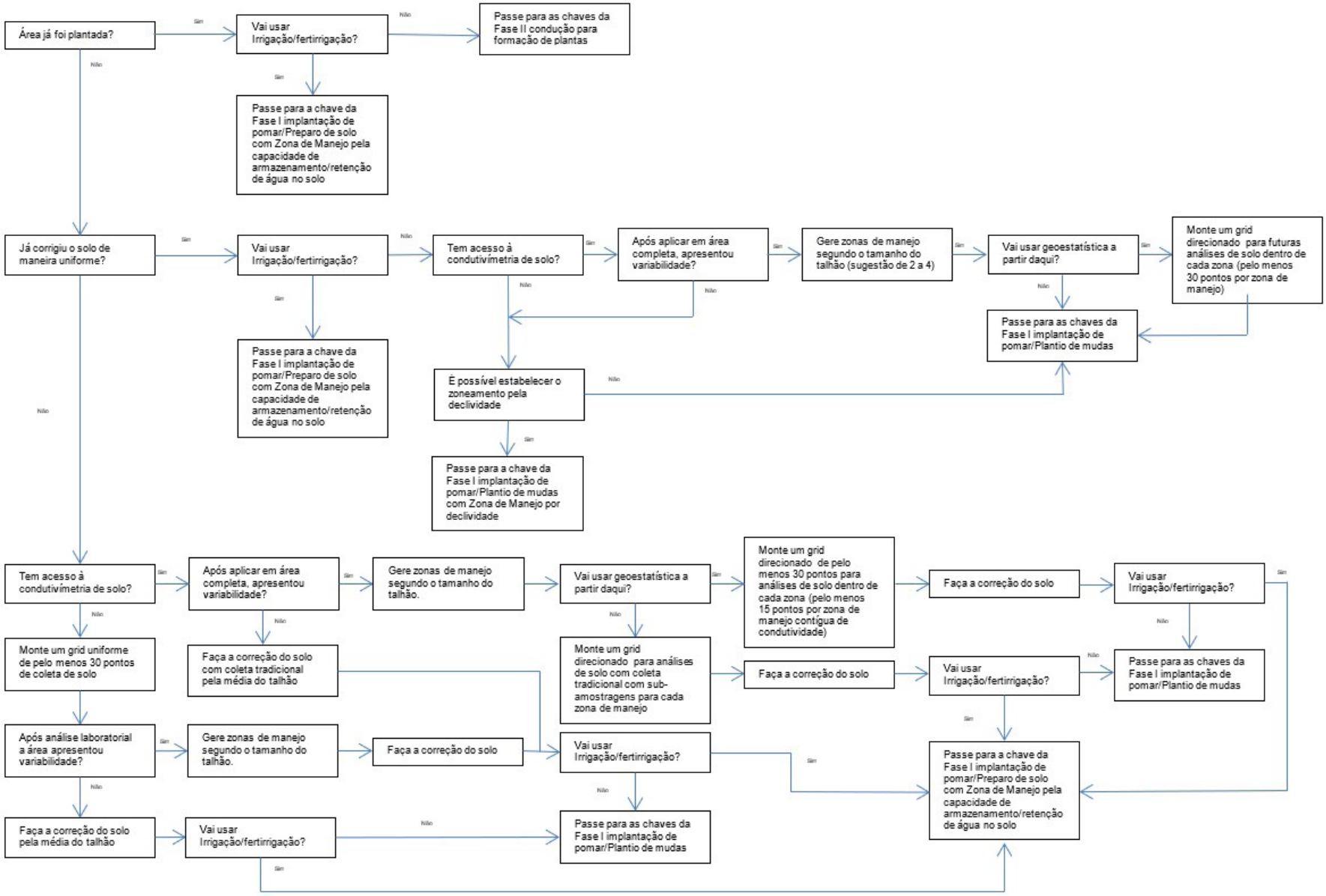
b) Não é possível aplicar fruticultura de precisão;

c) Vá para uma nova chave de decisão.

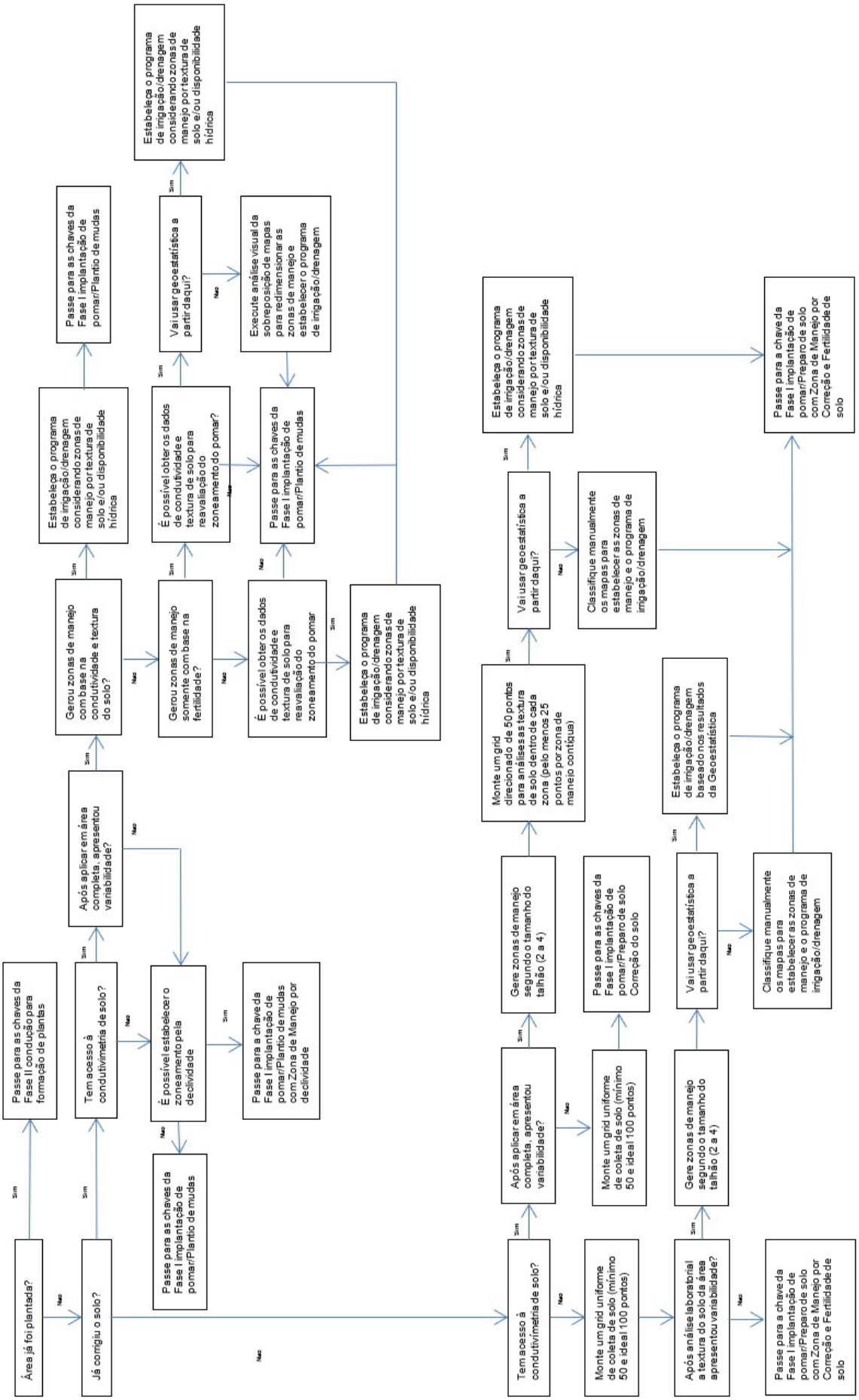
Uma vez que o objetivo neste momento é apoiar o usuário a entender a variabilidade do seu ambiente e torná-la mais fácil de ser trabalhada pelo agrupamento das "manchas" com características mais próximas em zonas maiores com maior chance de manejo, não se planejou fornecer as metodologias/orientações técnicas que o usuário pode/deve utilizar para a execução de eventuais ações corretivas para o manejo da variabilidade, uma vez que a aplicação dessas técnicas agronômicas são dependentes de cada ambiente e diferentes culturas, sendo que o usuário já deve dispor desse conhecimento antecipadamente para dar seguimento às correções apontadas pelas zonas de manejo geradas por esse algoritmo.

Quadro 1. Tipos de zonas de manejo possíveis de serem geradas segundo suas especialidades.

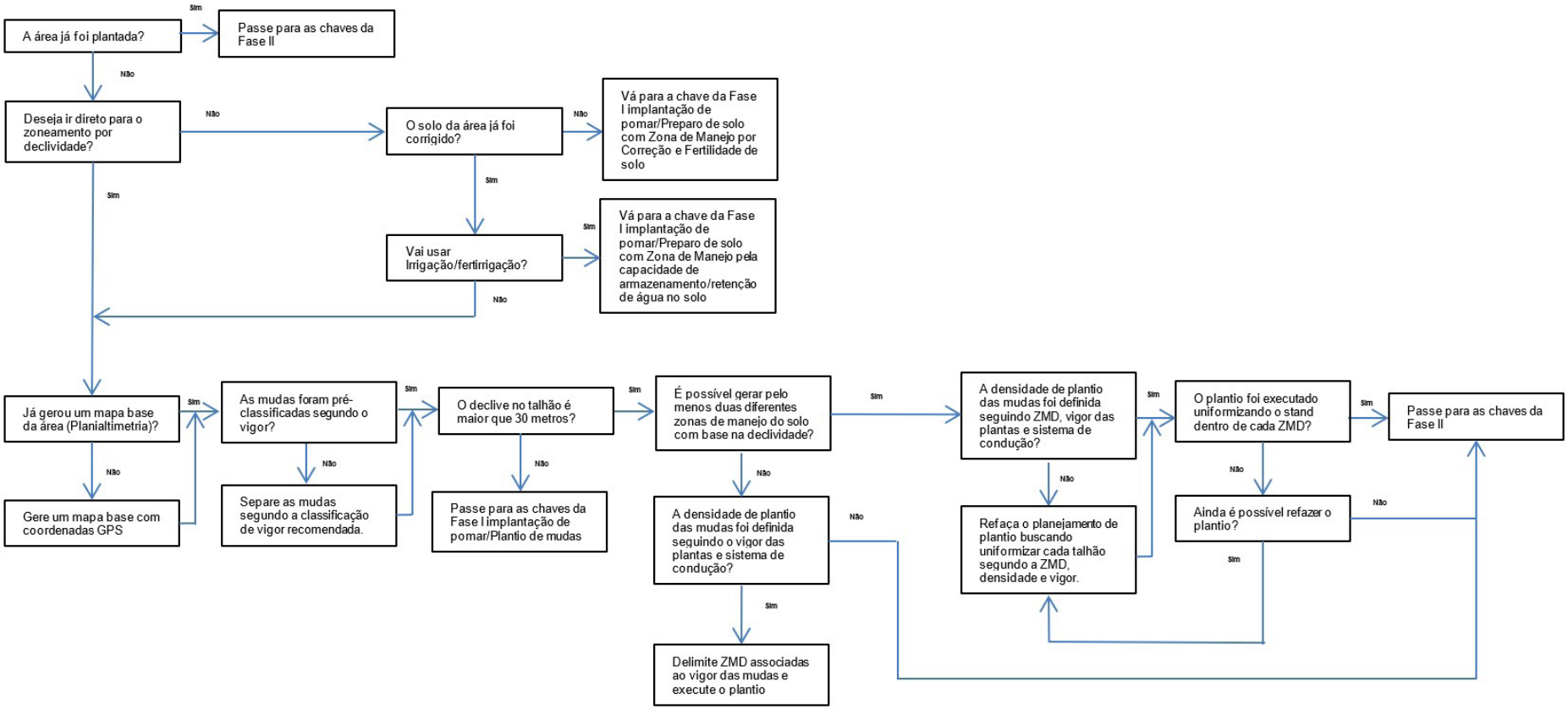
Fase I – Implantação do pomar
▪ Geração de zonas de manejo homogêneas com base em parâmetros de solo
• Fertilidade
• Capacidade de armazenamento/retenção de água no solo
• Topografia
Fase II – Geração de zonas de manejo homogêneas com base em condução e formação de plantas
▪ Geração de zonas de manejo homogêneas com base em parâmetros de planta
• Vigor
• Nutrição
• Quebra de dormência
Fase III – Geração de zonas de manejo homogêneas com base em manejo de pré-produção e colheita
• Raleio
• Fitossanidade
• Produção (previsão e colheita)



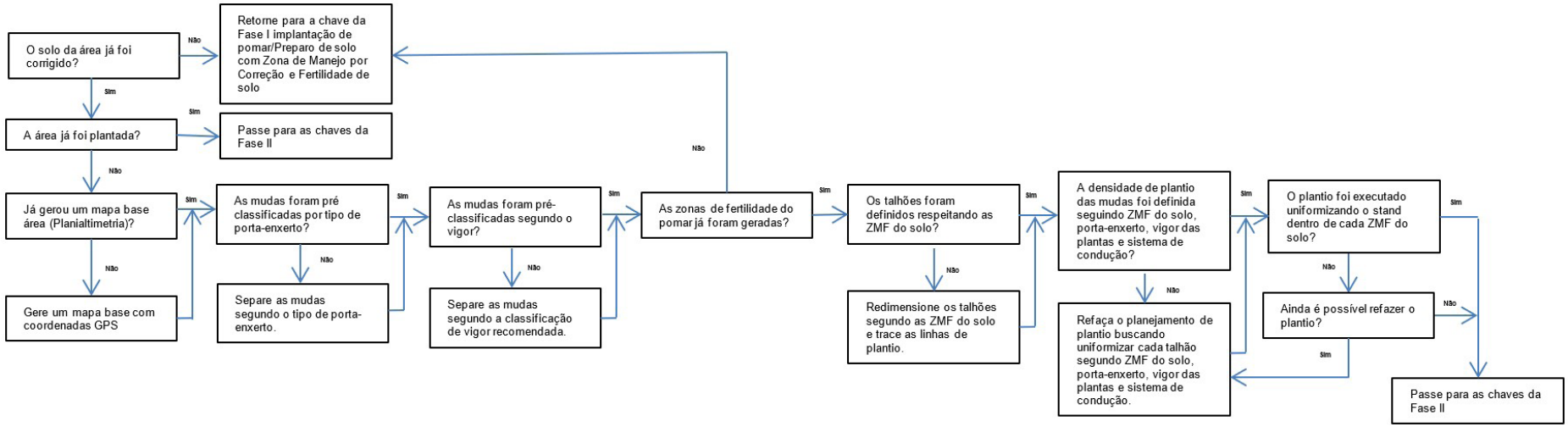
Fase I. Implantação de pomar/Preparo de solo com zona de manejo por correção e fertilidade de solo



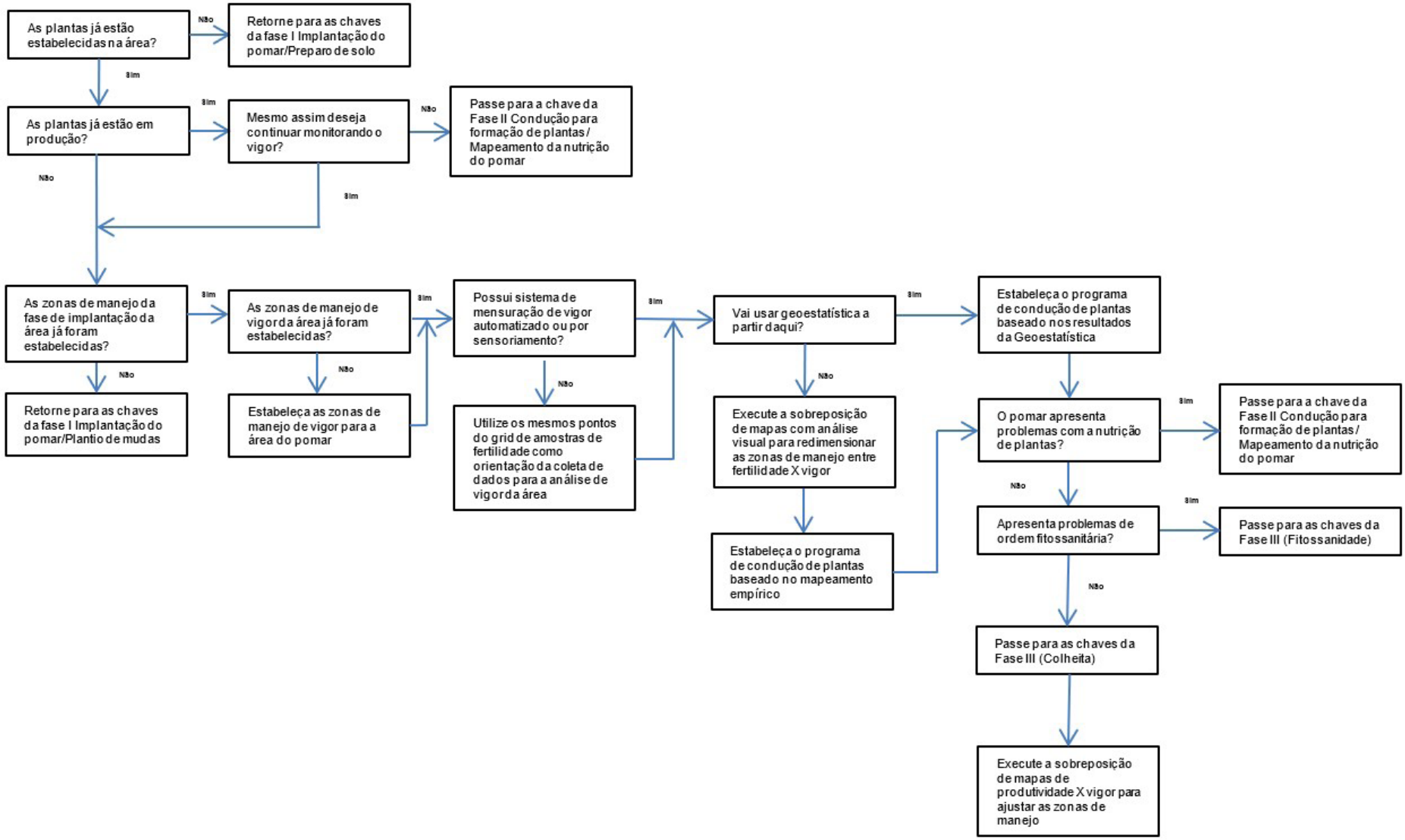
Fase I. Implantação de pomar/Preparo de solo com zona de manejo pela capacidade de armazenamento/retenção de água no solo



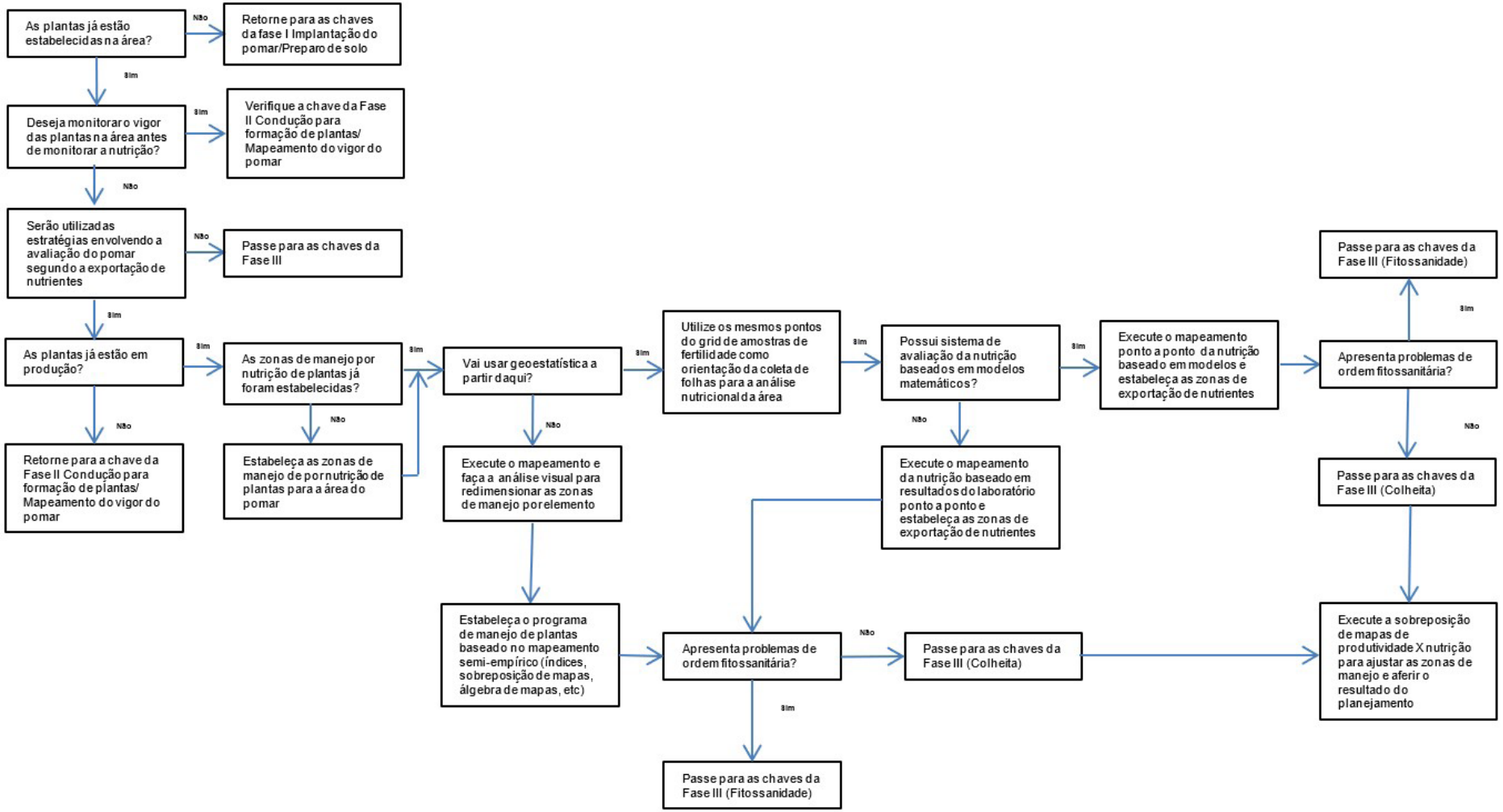
Fase I. Implantação de pomar/Plantio de mudas com zona de manejo por declividade (ZMD)



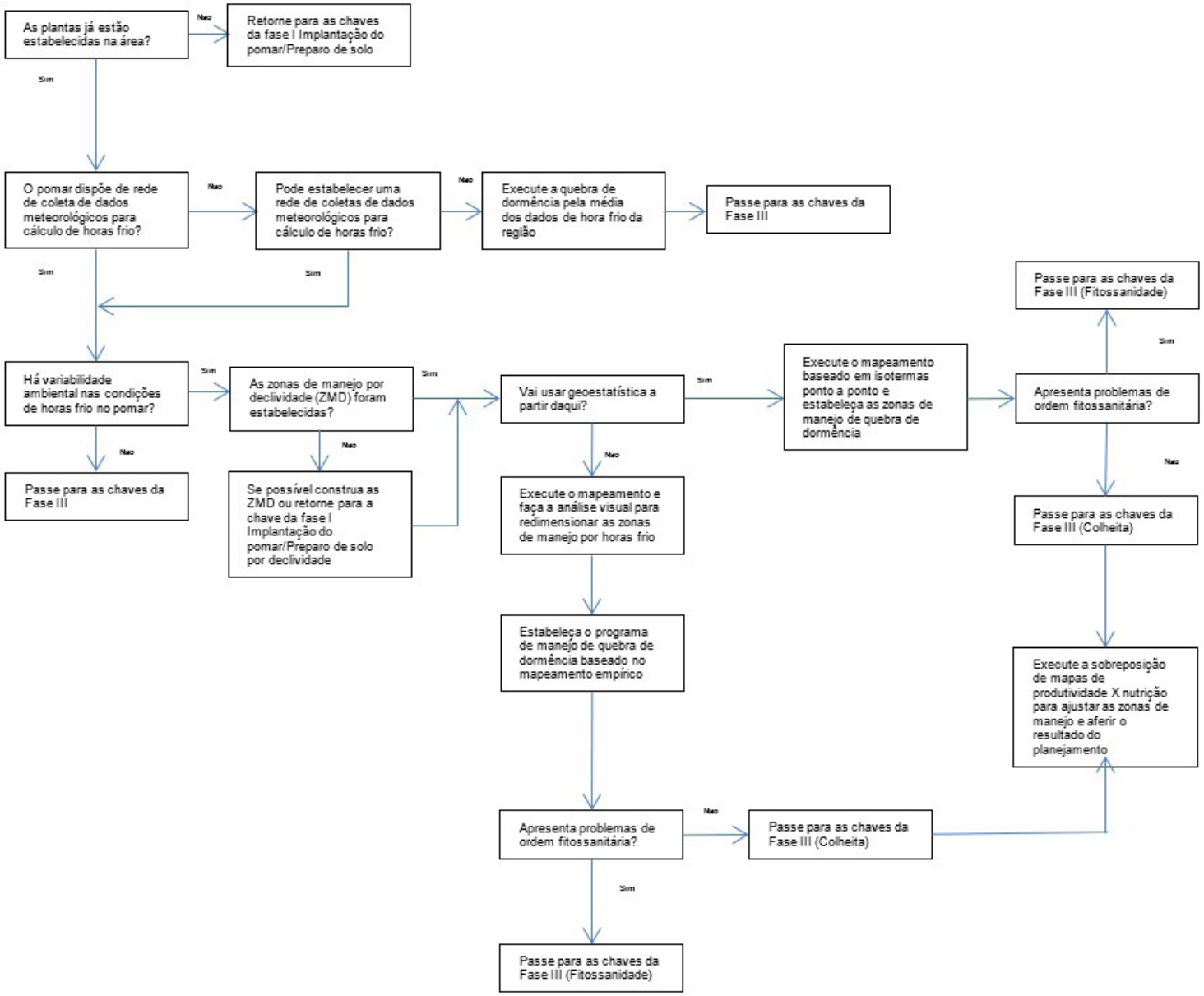
Fase I. Implantação de pomar/Plantio de mudas baseado na zona de manejo por fertilidade do solo (ZMF)



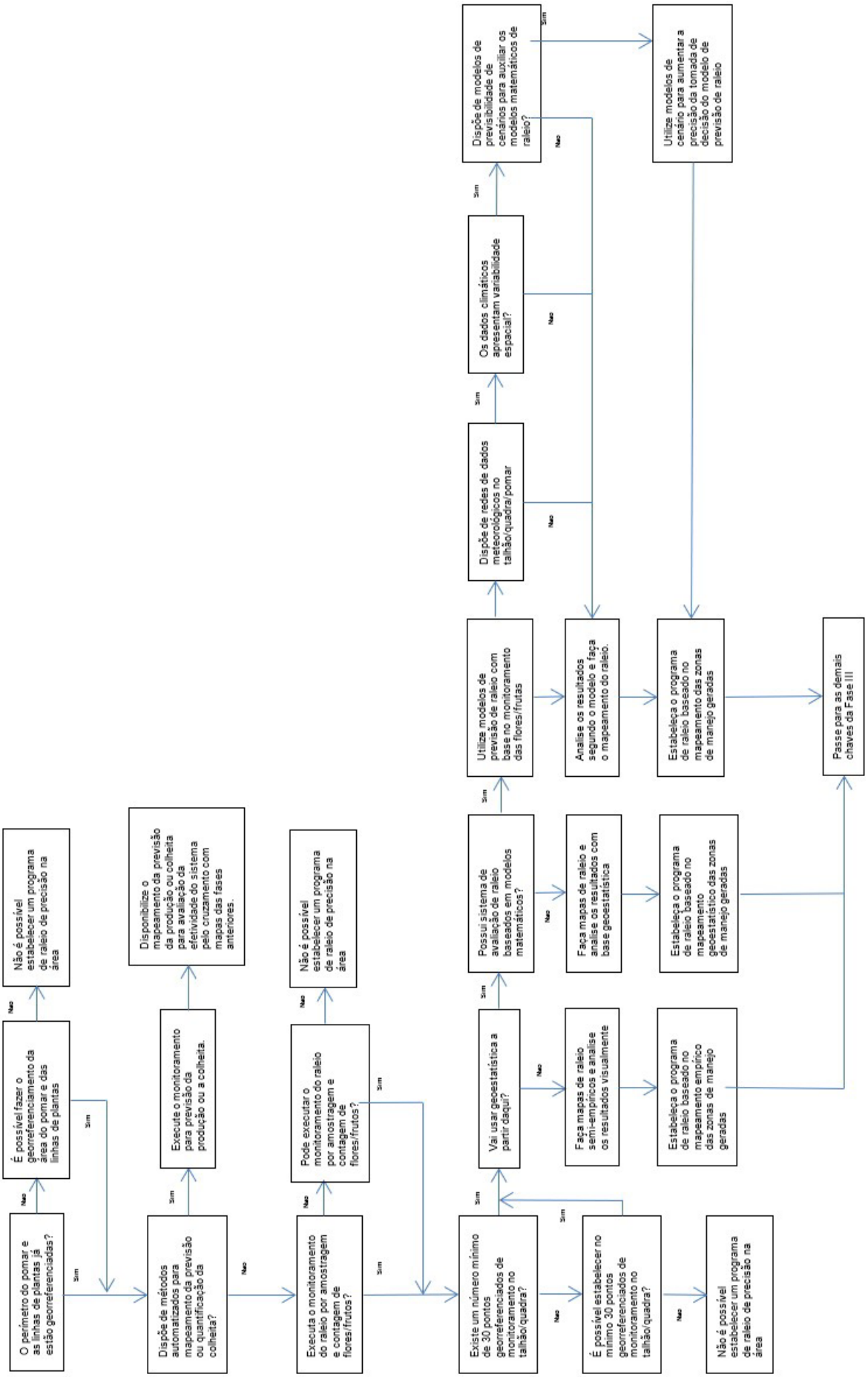
Fase II. Condução para formação de plantas/Mapeamento do vigor do pomar



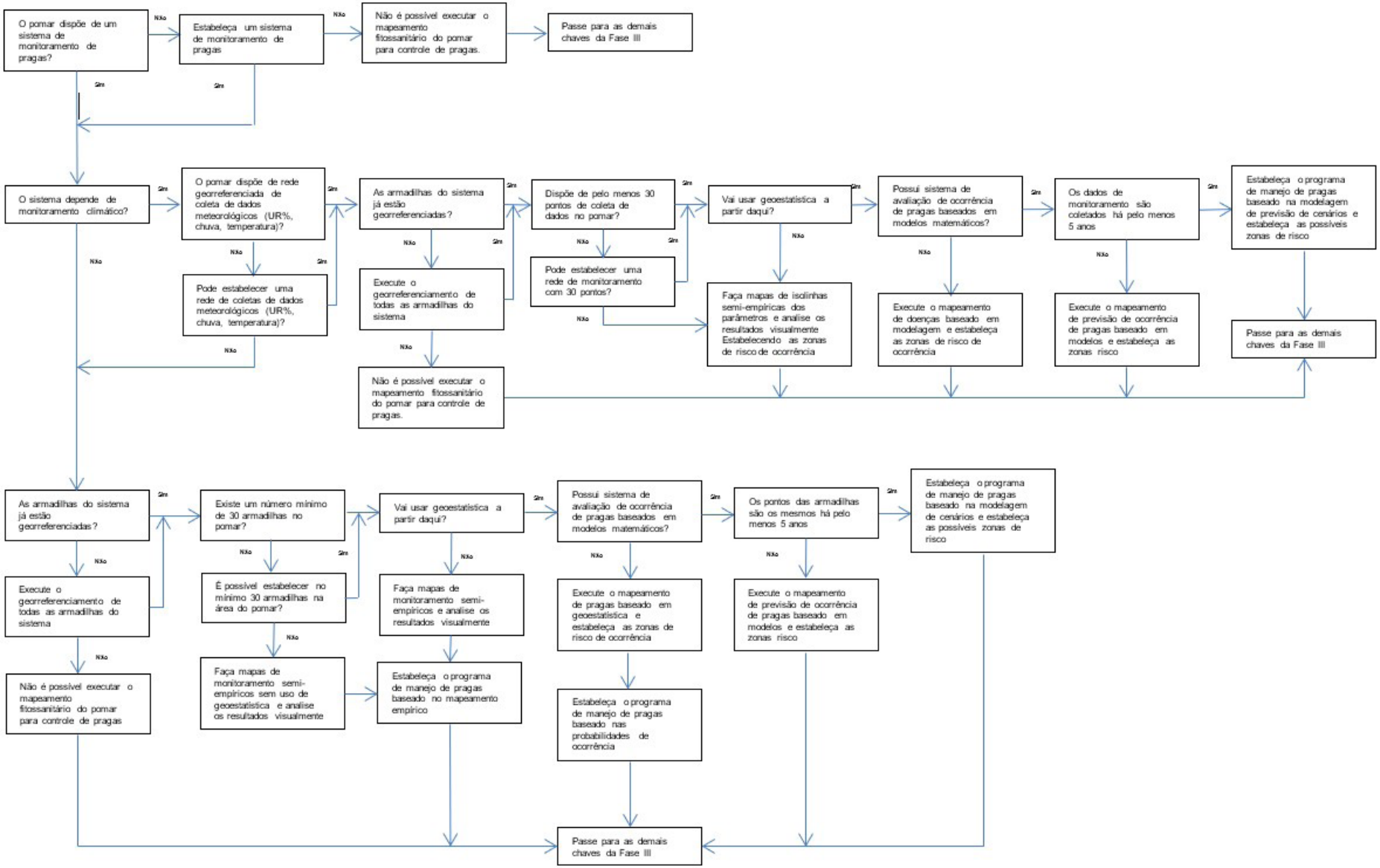
Fase II. Condução para formação de plantas/Mapeamento da nutrição do pomar



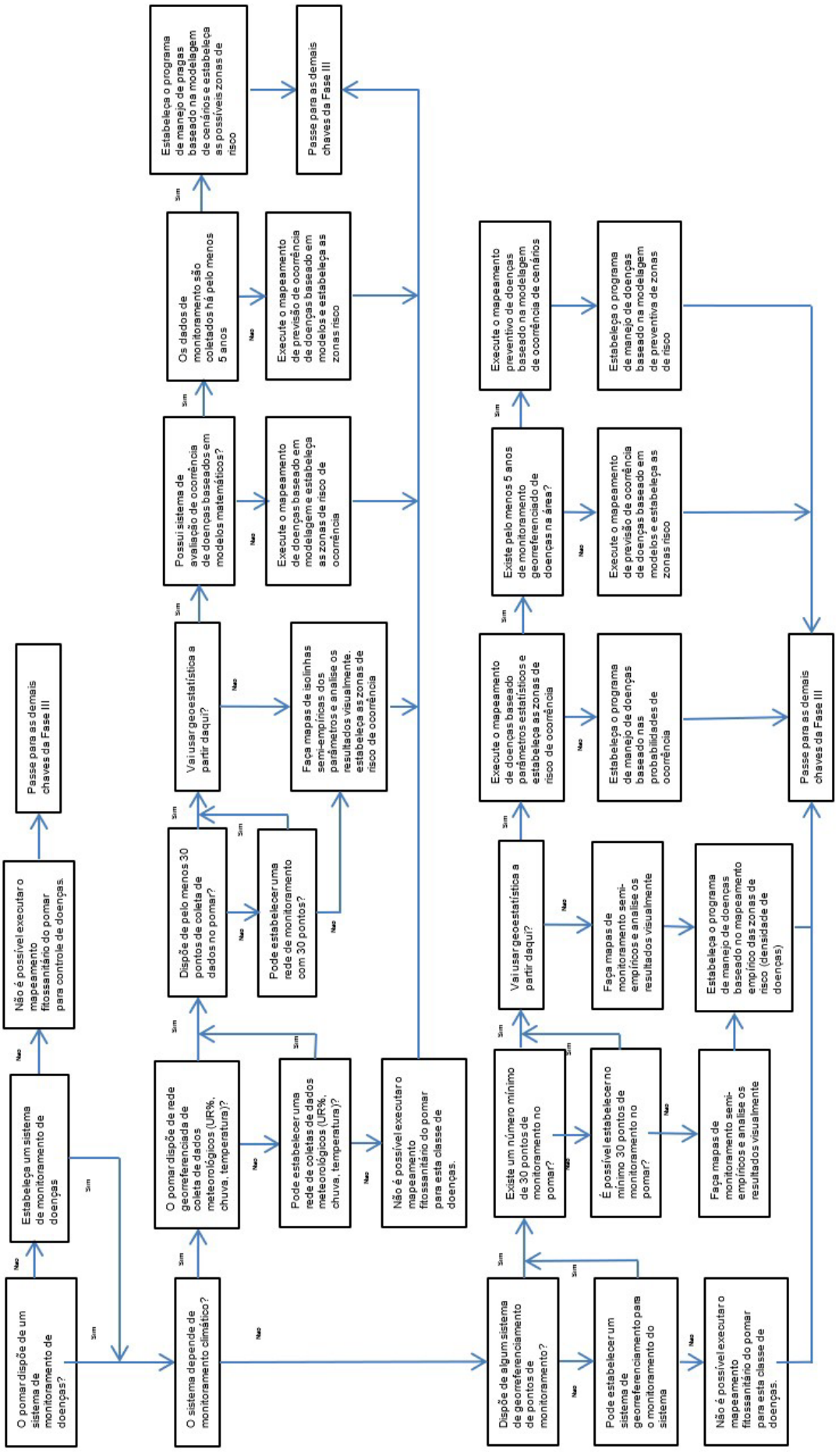
Fase II. Condução para formação de plantas/Mapeamento para quebra de dormência



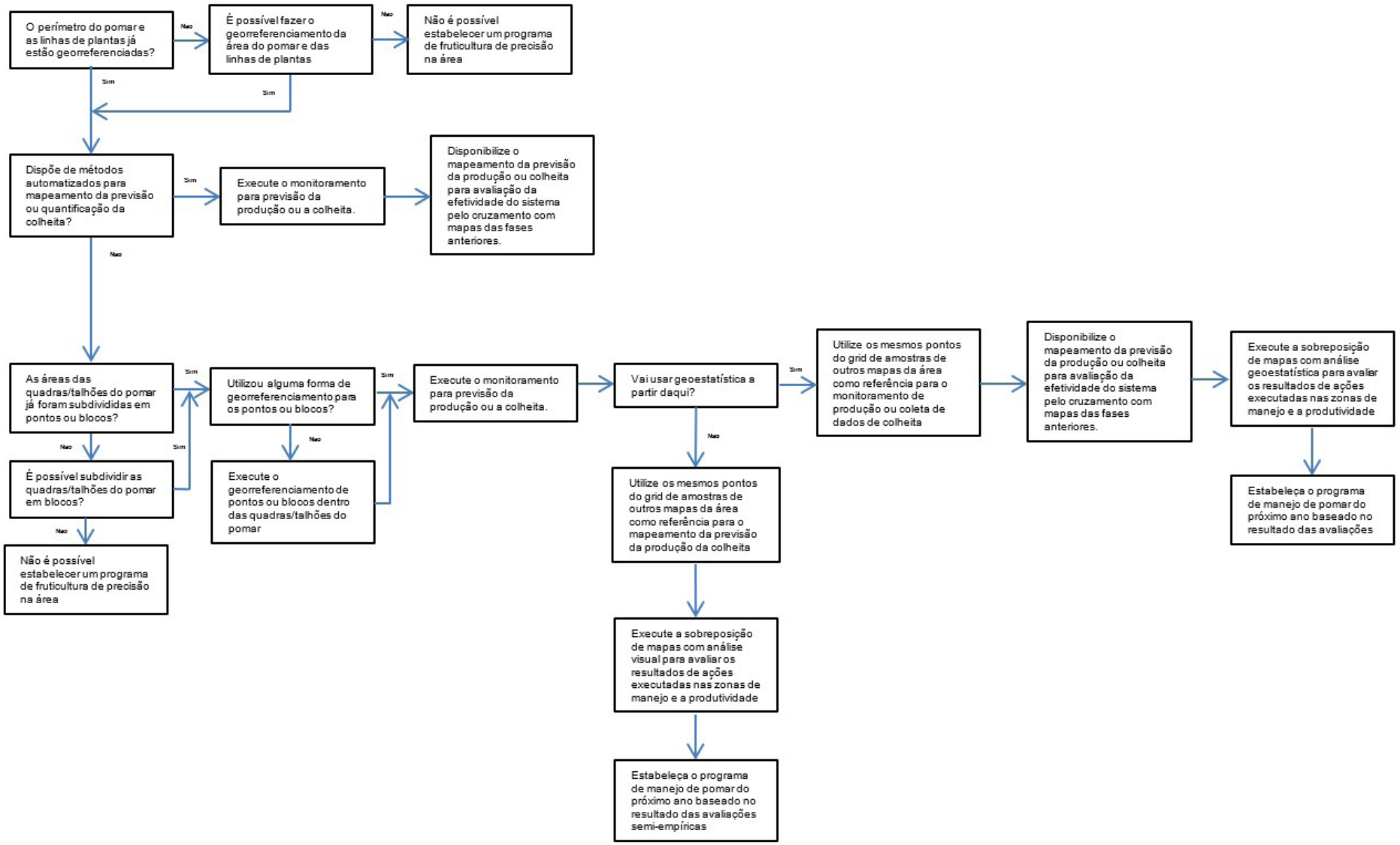
Fase III. Mapeamento fitotécnico do pomar/Raleio de frutos



Fase III. Mapeamento fitossanitário do pomar/Pragas



Fase III. Mapeamento fitossanitário do pomar/Doenças



Fase III. Mapeamento da colheita/Previsão da produtividade

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A disponibilização desse algoritmo, na forma de um fluxograma, auxiliará os tomadores de decisão, técnicos ou produtores rurais na gestão de pomares de maçã, passando a considerar as diferentes zonas de manejo como um dos principais critérios disponíveis para o gerenciamento da variabilidade espacial e temporal. Com isso, será possível a redução de erros atualmente resultantes da adoção do parâmetro médio na ação decisória, com consequente aumento da eficiência técnico-produtiva.

REFERÊNCIAS

BAZZI, C. L.; MARTINS, M. R.; CORDEIRO, B. E.; GEBLER, L.; DE SOUZA, E. G.; SCHENATTO, K.; DE PAULA FILHO, P. L.; SOBJAK, R. Yield map generation of perennial crops for fresh consumption. Precision Agriculture, v. 1, p. 698-711, 2022. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-021-09855-2.

CHILDERS, N. M.; MORRIS, J. R.; SIBBETT, G. S. Soil management for apples. In: CHILDERS, N. F. (ed.). **Modern Fruit Science: Orchard and small fruit culture**. 10 ed. Auburndale: AGScience Inc, 1995. p. 71-91.

GEBLER, L.; GREGO, C. R.; VIEIRA, A. L.; KUSE, L. R. Spatial influence of physical and chemical parameters on management zone definition in apple orchards. **Engenharia Agrícola**, v. 35, p. 1160-1171, 2015. DOI: http://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n6p1160-1171/2015.

FERREE, D. C.; SCHUPP, J. R. Pruning and training physiology. In: FERREE, D. C.; WARRINGTON, I. J. (ed.). **Apples: botany, production, and uses.** Wallingford: CAB International, 2003. p. 319-344. DOI: http://doi.org/10.1079/9780851995922.0319.

MANZANO, J. A. N. G.; OLIVEIRA, J. F. **Algoritmos:** Lógica para desenvolvimento de programação de computadores. 29. ed. São Paulo. Érica, 2019. 368p.

Geração de zonas de manejo em pomares de macieiras com base em NDVI e produtividade

57

Generation of management zones in apple orchards based on NDVI and productivity

Luciano Gebler[1], Andrea De Rossi[2], Renata Bulling Magro[3], Eduardo Antonio Speranza[4,5], Marcio da Silva Santos[6], Jardel Talamini de Abreu[7]

[1] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br*

[2] *Pesquisadora, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, andrea.derossi@embrapa.br*

[3] *Engenheira Ambiental e Sanitarista, Universidade de Santa Catarina, Bolsista DTI, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, renatamagro4@gmail.com*

[4] *Bacharel, Ciência da Computação, Universidade de São Paulo, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, São Carlos (SP), Brasil, eduardo.speranza@embrapa.br*

[5] *Analista, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil*

[6] *Engenheiro Agrônomo, Pesquisador, Agriexata, Vacaria (RS), Brasil, geoprural@gmail.com*

[7] *Engenheiro Agrônomo, Pesquisador, Agriexata, Vacaria (RS), Brasil, jardeltalamini@agriexata.com.br*

RESUMO

Índices de vegetação, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), configuram ferramentas úteis para a geração de informações rápidas e precisas sobre as condições vegetativas de pomares, podendo contribuir para o aumento da produtividade. A definição de zonas de vigor no pomar, no início do ano agrícola, é uma estratégia importante, porque é possível manejar as plantas com base nas zonas geradas ainda no mesmo ciclo. Métodos tradicionais de mensuração do vigor das plantas, como a medida do diâmetro do tronco ou do volume da copa, mesmo que por amostragem, são dispendiosos e demorados. Ferramentas de sensoriamento proximal são opções econômicas e rápidas para coleta desse tipo de informações. Assim, a aplicabilidade do NDVI para classificação de padrões temporais de velocidade de crescimento vegetativo de pomares de macieira tem sido avaliada na Embrapa Uva e Vinho, em Vacaria-RS, a fim de identificar os períodos capazes de fornecer dados mais relevantes a respeito do vigor do pomar e favorecer a definição de zonas de manejo. Utiliza-se um sensor proximal para obtenção do NDVI a campo, gerando mapas interpolados e, a seguir, calcula-se a taxa de crescimento vegetativo. A produtividade dos pomares é usada como variável alvo. Os resultados dos primeiros anos do estudo indicam que é possível identificar os períodos temporais mais relevantes para a aquisição de dados úteis para um manejo diferenciado do pomar. Assim, espera-se contribuir com um método, relativamente aos métodos tradicionais, de menor custo e menos demorado para a definição de zonas de manejo no pomar.

Palavras-chave: sensoriamento proximal; fruticultura de precisão; mapas de vigor.

ABSTRACT

Vegetation indices, such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), are useful tools for generating fast and accurate information about the vegetative conditions of orchards, which can contribute to increased productivity. The definition of vigor zones in the orchard at the beginning of the growing cycle is an important strategy because it is possible to manage the plants based on the zones generated in the same cycle. Traditional methods of measuring plant vigor, such as measuring trunk diameter or canopy volume, even by sampling, are expensive and time-consuming. Proximal sensing tools are cost-effective and fast options for gathering this type of information. Thus, the applicability of the NDVI for classifying temporal patterns of vegetative growth rate of apple orchards has been evaluated at Embrapa Uva e Vinho in Vacaria, state of Rio Grande do Sul, Brazil, in order to identify the periods capable of providing more relevant data regarding the orchard vigor and favoring the definition of management zones. A proximal sensor is used to obtain the NDVI in the field, generating interpolated maps and then calculating the rate of vegetative growth. Orchard productivity is used as a target variable. The results of the two first years of the study indicate that it is possible to identify the most relevant periods for the acquisition of useful data for differentiated management of the orchard. Thus, it is expected to contribute with a low-cost and relatively inexpensive method for the definition of management zones in the orchard.

Keywords: proximal sensing; precision fruit crop; vigor maps.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000031

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão (AP) está diretamente relacionada à obtenção mais rápida e eficiente de informações sobre a variabilidade de parâmetros agronômicos durante as diferentes fases de crescimento vegetativo, no sentido de auxiliar a gestão ambiental da área e a tomada de decisão por parte dos produtores (Sinha et al., 2021). Os atuais esforços de investigação com relação às variabilidades temporal e espacial da produção de espécies frutíferas perenes contribuem para um crescente interesse em técnicas de sensoriamento remoto, principalmente para estimar variáveis biofísicas de áreas produtivas, como forma e tamanho do dossel das plantas, indicadores de qualidade, rendimento e vigor (Hall et al., 2003; Zarcotejada et al., 2005; Santos et al., 2022).

A partir de imagens obtidas por sensoriamento remoto, podem-se gerar os Índices de Vegetação (IVs), que são transformações lineares da reflectância do dossel e utilizam faixas do espectro eletromagnético relacionadas às características vegetativas. Entre os IVs, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) vem sendo utilizado desde os anos 1970 para monitoramento de biomassa (Rouse et al., 1973; Gamon et al., 1995), pois é um indicador sensível à quantidade e à condição da vegetação, cujos valores variam no intervalo de -1 a 1. O NDVI está diretamente relacionado aos marcadores biofísicos de rendimento e de crescimento das culturas (Asner, 1998) e possui aplicações diretas para o monitoramento de perfis sazonais e temporais da atividade fotossintética de diferentes cultivos agrícolas.

Os perfis temporais de NDVI podem ser utilizados para análise de variações fisiológicas, duração de períodos de senescência e de crescimento (Ponzoni et al., 2012). Na produção de *Vittis vinifera* L., o NDVI vem sendo utilizado para a avaliação de crescimento de biomassa e classificação de vigor (Bonilla et al., 2015; Oldoni et al., 2021; Vélez et al., 2022). Inclusive, é considerado como um indicador indireto de quantidade e qualidade da produção de videiras (Hall et al., 2010; Cancela et al., 2017). No entanto, para outras culturas perenes, por exemplo, a macieira (*Malus domestica* B.), o uso do NDVI como uma ferramenta para quantificação e caracterização temporal do crescimento vegetativo carece de mais análises.

2 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi desenvolvido em dois pomares de macieira, nomeados Fitotecnia e Gestão, que contêm a cultivar Maxi Gala com 11 anos de idade, localizados na Estação Experimental de Fruticultura de Clima Temperado da Embrapa Uva e Vinho, em Vacaria-RS.

3 OBTENÇÃO DO NDVI POR SENSOR PROXIMAL

Para obtenção das respostas espectrais da cultura, foram realizadas leituras de NDVI com o sensor óptico ativo FLEXUM, de fabricação da empresa brasileira Falker. O sensor possui resolução de 50 cm e realiza uma leitura por segundo de forma contínua, o que garante a produção de mapas de pontos de alta densidade.

As leituras com o sensor foram realizadas dias após a superação da dormência (DASD) das plantas de ambos os pomares (Fitotecnia e Gestão), em intervalos semanais ou quinzenais, aproximadamente, totalizando sete leituras. As leituras de NDVI do ano de 2020 iniciaram no dia 15 de setembro e finalizaram no dia 27 de outubro. Para 2021, leituras foram realizadas entre os dias 13 de setembro e 29 de novembro, resultando em um tempo maior para coleta de dados em cerca de um mês. No entanto, observou-se pouca variação dos valores de NDVI a partir do início de novembro (dados não apresentados); dessa forma, optou-se por apresentar, para ambos os pomares, a evolução do NDVI nos períodos de leituras concomitantes para 2020 e 2021, em média até os 62 DASD (Tabela 1).

4 PROCESSAMENTO DOS DADOS

O processamento dos dados foi realizado no *software* QGIS 3.16. A primeira etapa do processamento consistiu em uma análise exploratória com a finalidade de identificar valores anômalos (*outliers*) de NDVI. Para remoção destes, realizaram-se a limpeza e a fil-

Tabela 1. Datas de leitura de NDVI em 2020 e 2021.

Leitura N#	Ano 2020		Ano 2021	
	dd/mm	DASD	dd/mm	DASD*
1	15/9	17	13/9	16
2	22/9	24	22/9	25
3	29/9	31	29/9	32
4	06/10	38	07/10	40
5	14/10	46	19/10	52
6	21/10	53	26/10	59
7	27/10	59	03/11	66

DASD: dias após a superação da dormência.

tragem dos dados por análise estatística (Boxplot), e a análise da distribuição espacial dos pontos (verificação dos valores em relação à sua vizinhança).

Para geração de mapas do tipo raster, contendo as informações de NDVI para a totalidade das áreas de interesse, os dados foram interpolados a partir do método do inverso de potência das distâncias, utilizando parâmetro de potência 2 (IDW2).

5 OBTENÇÃO DA TAXA DE CRESCIMENTO VEGETATIVO (TCV)

A partir da série temporal de mapas de NDVI interpolado, calculou-se a derivada pela álgebra de mapas no SIG (Equação 1) para cada um dos pomares avaliados. O cálculo da derivada permitiu a obtenção da taxa de variação de crescimento vegetativo (TCV) ao longo do tempo:

$$TCV = \frac{(L_i - L_{1-1})}{\Delta t} \quad (1)$$

Em que TCV é a taxa de crescimento vegetativo (adimensional); L_i é o mapa de NDVI da leitura atual; L_{i-1} é o mapa de NDVI da leitura anterior, e Δt é o intervalo de tempo entre as leituras.

Em seguida, para elaboração dos mapas temáticos, realizou-se a reclassificação dos mapas da TCV em cinco classes. Para fins de comparação temporal da TCV, definiram-se classes com base na TCV do ano de 2020, sendo utilizadas as mesmas classes para a categorização dos resultados do ano de 2021 (Tabela 2).

6 ANÁLISE DO NDVI *VERSUS* PRODUTIVIDADE PARA GERAÇÃO DE ZONAS DE MANEJO (ZM)

Para uma análise preliminar referente à geração de zonas de manejo (ZM) no pomar, os dados de NDVI foram cruzados com os dados de produtividade. Devido a problemas de colheita em 2020, apenas os dados do pomar Gestão puderam ser avaliados. Para essa análise, utilizando a metodologia descrita em Gavioli et al. (2016), foram utilizados: a) algoritmos de agrupamento de dados; b) diferentes combinações de atributos de entrada compreendendo o NDVI nos diferentes estádios fenológicos da cultura, e c) verificação da redução da variância da produtividade dos mapas de ZM produzidos.

7 VARIAÇÕES TEMPORAIS DO NDVI

A Figura 1 apresenta a variação dos índices NDVI dos pomares de macieira Fitotecnia e Gestão para a safra 2020/2021 e para a safra 2021/2022. Para ambos os pomares, foram identificados maiores valores de NDVI a partir de 46 DASD no ano de 2021, em comparação ao ano anterior, os quais estão associados à maior presença de vegetação. Diversos fatores contribuem para variações temporais de NDVI em pomares de espécies frutíferas de clima temperado, como a quantidade de horas-frio, o valor acumulado de precipitação e as variações de temperatura máxima e mínima, os quais podem impactar de forma positiva ou negativa o desenvolvimento vegetativo da planta para o ano seguinte (Petri et al., 2012).

Tabela 2. Descrição das classes para classificação da taxa de crescimento vegetativo (TCV).

Classe	Interpretação	Intervalo de valores
1	Muito baixa	(0 - 0,0014)
2	Baixa	(0,0014 - 0,0124)
3	Média	(0,0124 - 0,0234)
4	Alta	(0,0234 - 0,0345)
5	Muito alta	(0,0345 - 0,0455)

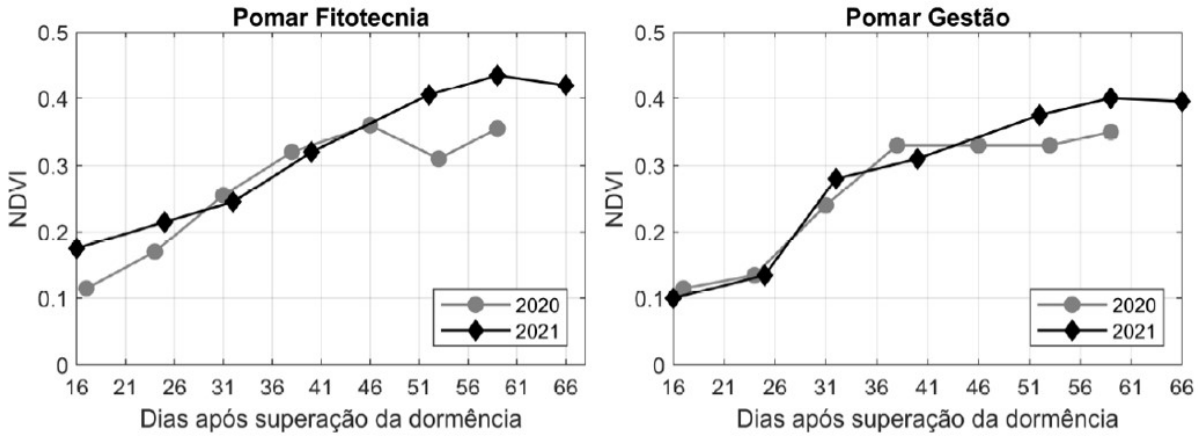


Figura 1. Valores médios do índice de vegetação (NDVI) das leituras realizadas nos pomares Fitotecnia e Gestão em 2020 e 2021.

Além disso, os resultados demonstraram uma tendência temporal de crescimento dos valores de NDVI (Figura 1). Para o pomar Fitotecnia, em 2020, os valores médios de NDVI variaram entre 0,115 aos 17 DASD e 0,355 aos 59 DASD. Em 2021, foram encontrados valores entre 0,175 (16 DASD) e 0,420 (66 DASD). Essa tendência foi identificada também no pomar Gestão, em 2020, quando os valores variaram entre 0,115 e 0,350; para 2021, obteve-se NDVI variando entre 0,100 e 0,395. É natural que exista uma evolução da área foliar das plantas a partir da superação da dormência, fato evidenciado pelos resultados obtidos neste trabalho.

Nesse sentido, espera-se que menores valores de NDVI sejam identificados no período de dormência da planta, e maiores valores sejam identificados ao longo do ciclo vegetativo até sua estabilização, com enfolhamento máximo das plantas. Nesse estudo, a quebra de dormência foi realizada no dia 28 de agosto de 2020 e, no ano seguinte, em 27 de agosto de 2021, sendo perceptível a tendência de incremento do NDVI ao longo dos meses de setembro e outubro, que correspondem ao período entre 16 e 40 DASD (Tabela 1). Dessa forma, a avaliação dos padrões de NDVI dos anos de 2020 e 2021 reflete o comportamento natural dos estádios de desenvolvimento fenológico da macieira, considerando o período de realização das leituras.

Os valores de NDVI obtidos a partir de 59 DASD apresentaram tendência à estabilidade (Figura 1), o que pode indicar estabilização do crescimento vegetativo dos pomares. Isso pode ser explicado pelo fato de que, a partir de um dado momento, a energia da planta que estava sendo utilizada para o aumento de área foliar passa a ser direcionada para o desenvolvimento dos frutos (Pallardy, 2010). Na fenologia da macieira, os 59 DASD correspondem à fase de crescimento reprodutivo, quando os fotoassimilados produzidos pela planta são direcionados prioritariamente aos frutos, em detrimento do crescimento de folhas, ramos, etc. (Nachtigall; Dechen, 2006). Assim, ocorre um período contínuo de evolução dos valores de NDVI seguido por um período de estabilidade ou até mesmo de redução. Dessa forma, os resultados das leituras de NDVI indicaram que o período de 24 a 59 DASD parece ser o ideal para avaliação da evolução da biomassa e, consequentemente, da taxa de crescimento vegetativo nos pomares avaliados.

8 TENDÊNCIAS DA TAXA DE CRESCIMENTO VEGETATIVO (TCV)

A partir do cálculo da derivada do NDVI, obteve-se a taxa de crescimento vegetativo (TCV) da cultura com o objetivo de determinar a velocidade de evolução da biomassa ao longo da série temporal de estudo, assim como identificar os períodos de maior ou menor crescimento vegetativo. Caracterizou-se a TCV em diferentes classes, sendo a classe igual a 1 correspondente a uma taxa de crescimento muito baixa, e a classe igual a 5 indica taxa de crescimento muito alta (Tabela 2).

Verificou-se uma TCV média no período de 24 a 38 DASD – meados de setembro até meados de outubro – para o pomar Fitotecnia, em 2020 (Figura 2). De forma semelhante, os resultados obtidos para 2021 indicaram TCVs média e alta a partir de 25 a 40 DASD (Figura 3). Assim, o pico da taxa de crescimento vegetativo foi identificado no período supracitado, que corresponde ao final de setembro e início de outubro.

A TCV de uma planta ao longo do tempo pode ser relacionada com o vigor. Dessa forma, pode-se inferir que entre 25 e 40 DASD representou o período de maior taxa de desenvolvimento de biomassa, caracterizando o período o ideal para captura de imagens de sensoriamento remoto com o intuito de mensuração do vigor do pomar.

A partir de 52-53 DASD, observou-se predominância de TCVs baixa e muito baixa (Figuras 2 e 3), o que pode indicar a estabilização de crescimento da cultura. Os resultados dessa etapa estão em consonância com a tendência observada na avaliação temporal do NDVI, que apresentou aumento significativo no período de setembro a início de outubro, e estabilização da taxa de crescimento ao final de outubro.

A tendência de comportamento da TCV observado no pomar Fitotecnia é semelhante entre os anos de 2020 e 2021. A partir da avaliação temporal, identificou-se um padrão de crescimento vegetativo nessa área relacionado com os estádios fenológicos da macieira (Figura 4).

Para o pomar Gestão, os resultados da TCV são semelhantes entre os anos 2020 e 2021 (Figura 4). No entanto, em 2021, notou-se uma redução drástica na taxa de crescimento aos 52 DASD, o que não ocorreu no ano anterior. Sugere-se que isso pode ser um indicativo da variabilidade intrínseca ao desenvolvimento vegetativo da macieira na região dos Campos de Cima da Serra quando comparamos diferentes safras, mas também, principalmente, pela baixa precipitação pluvial nesse ano comparado ao ano anterior. Em 2020, a precipitação acumulada de julho a novembro foi de 1.471 mm, enquanto, em 2021, a precipitação acumulada no mesmo período foi de 577 mm (Inmet, 2022). Além disso, em média, a TCV para a última semana de leitura de NDVI realizada no pomar em 2020, que corresponde a 59 DASD, é igual a zero (Figura 4), o que

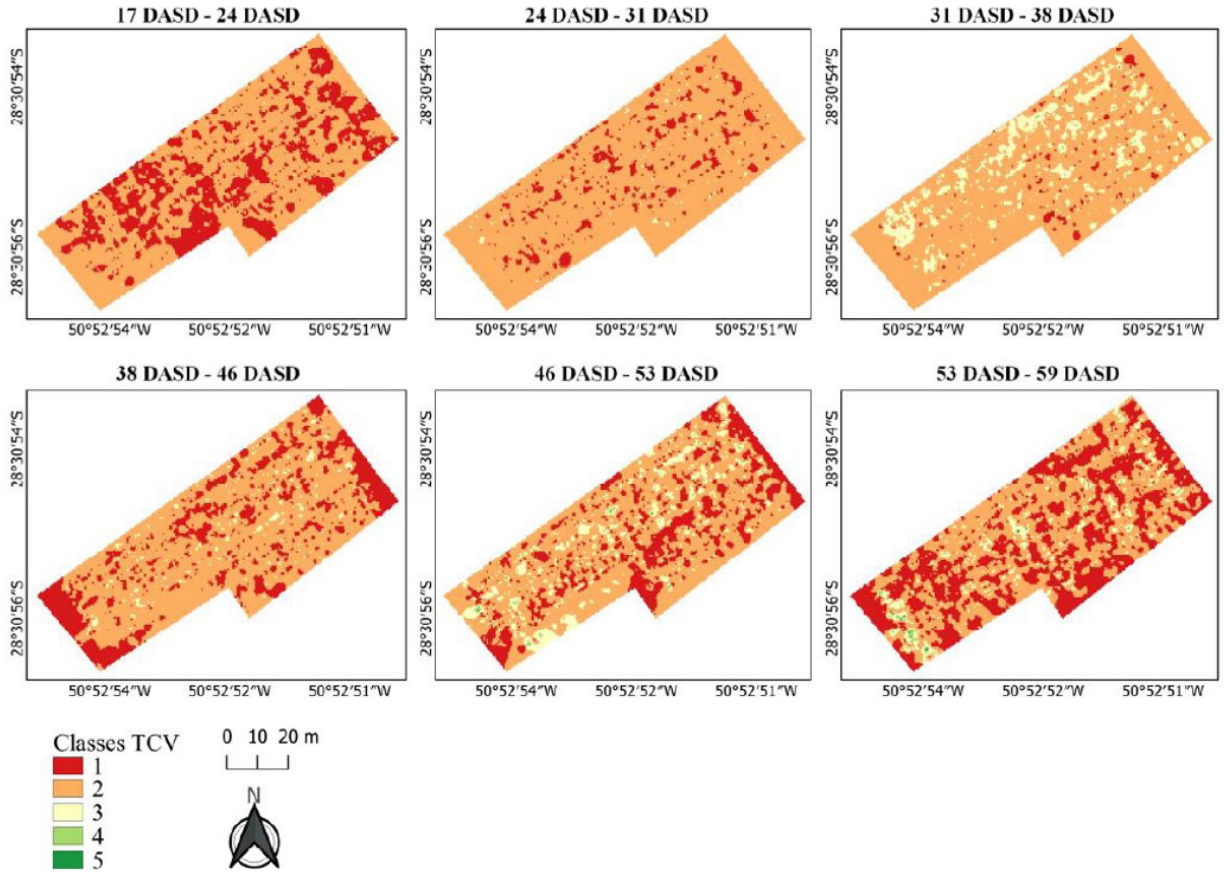


Figura 2. Mapas da taxa de crescimento vegetativo (TCV) no pomar Fitotecnia em 2020.

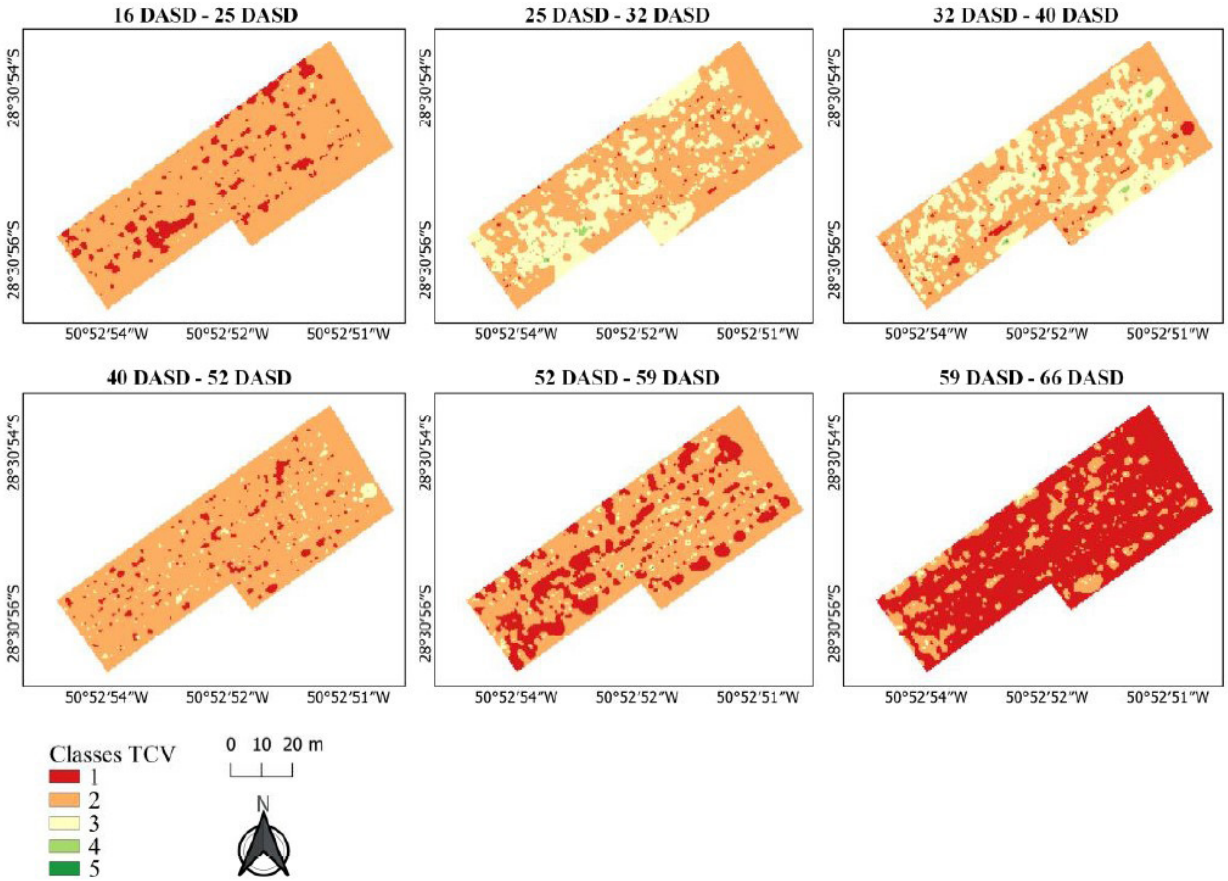


Figura 3. Mapas da taxa de crescimento vegetativo (TCV) no pomar Fitotecnia em 2021.

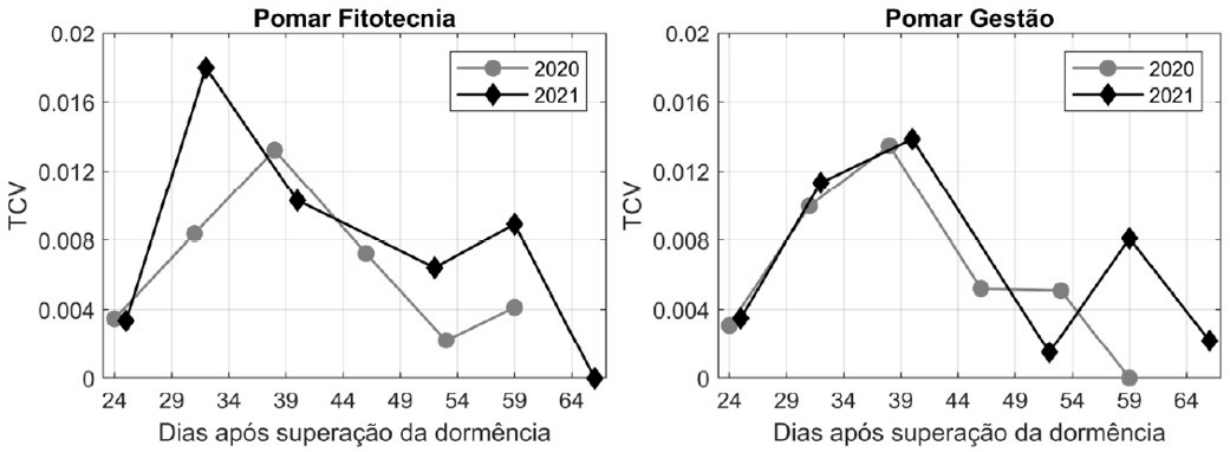


Figura 4. Taxa de crescimento vegetativo (TCV) média nos pomares Fitotecnia e Gestão ao longo do tempo.

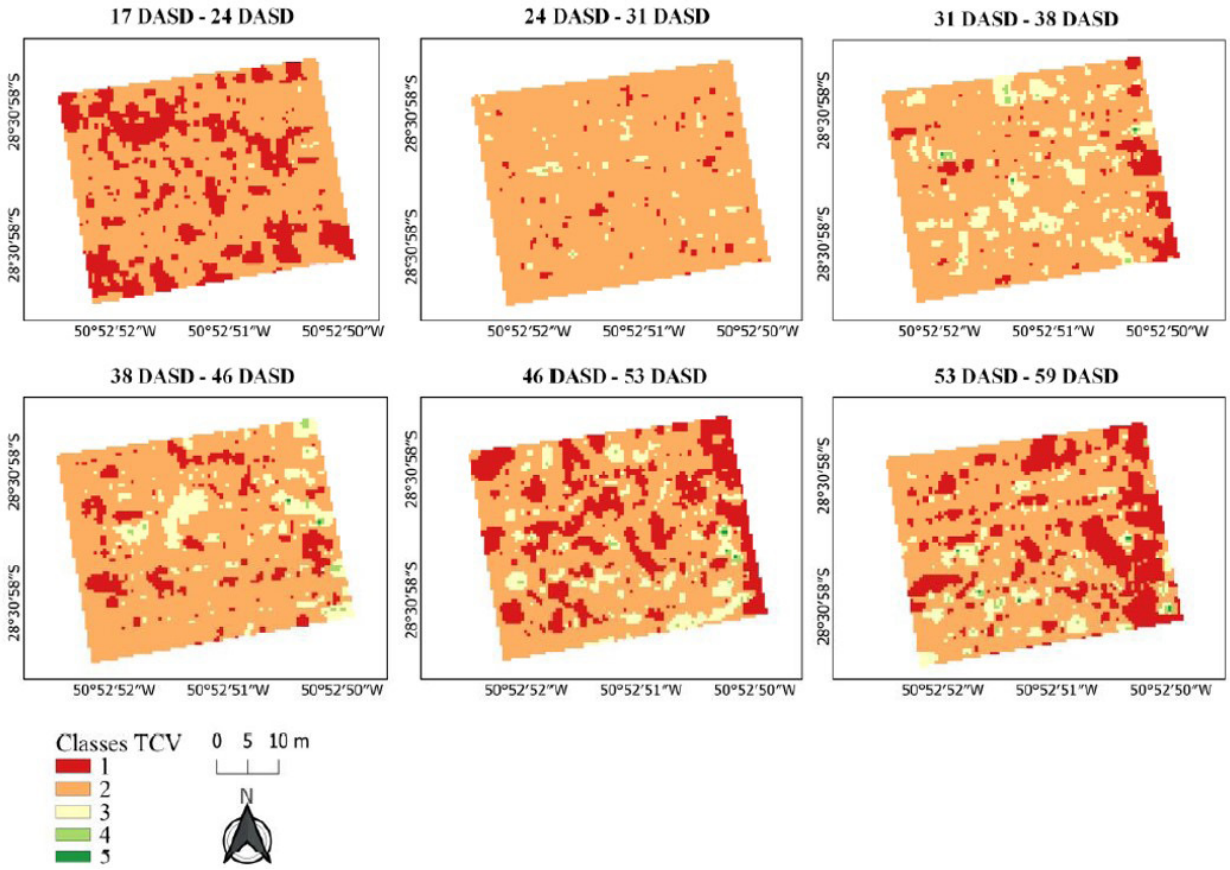


Figura 5. Mapas da taxa de crescimento vegetativo (TCV) no pomar Gestão em 2020.

corrobora com a estabilidade do desenvolvimento de biomassa constatada na análise temporal do NDVI.

Apesar de a tendência de taxa de crescimento de biomassa para o pomar Gestão ter sido semelhante nos anos analisados, para 2020, a TCV entre 24 e 38 DASD foi, em grande parte, considerada como baixa (Figura 5), enquanto que, para 2021, a TCV no mesmo período foi predominantemente média (Figura 6). Após esse período, para ambos os anos de análise, observamos aumento de área correspondente a TCVs baixa e muito baixa, respectivamente, sinalizando redução na velocidade de desenvolvimento de biomassa e consequente estabilidade no crescimento vegetativo.

A totalidade de área classificada com TCVs média e alta foi mais significativa em 2021 (Figura 6), indicando que uma maior área do pomar se desenvolveu a uma maior taxa em 2021, quando comparado ao ano anterior. Trabalhos que correlacionam

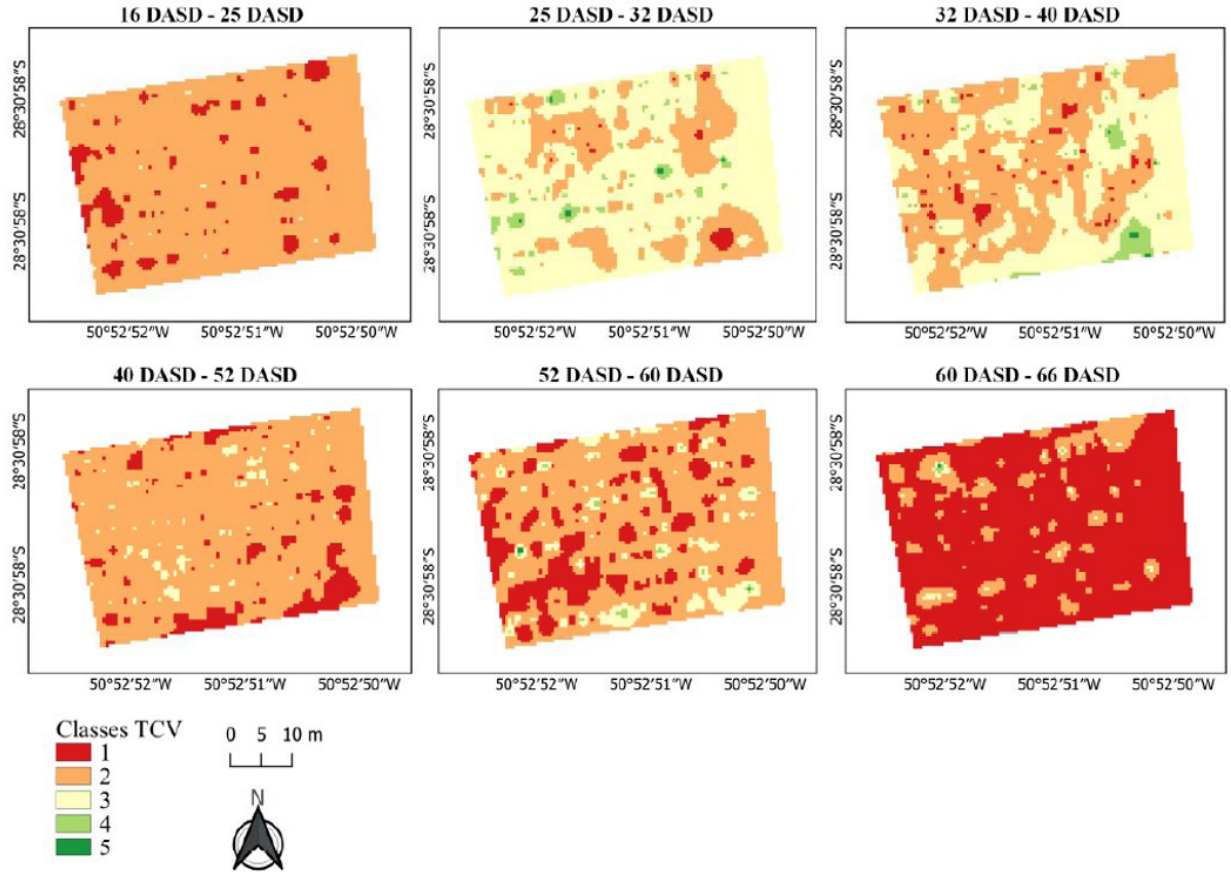


Figura 6. Mapas da taxa de crescimento vegetativo (TCV) para o pomar Gestão em 2021.

diferentes parâmetros agronômicos com a estimativa de vigor de pomares podem ser encontrados na literatura (Viau et al., 2005; Best et al., 2008), dentre os quais o NDVI, que pode ser relacionado com a velocidade de desenvolvimento de biomassa, a qual, por sua vez, pode ser considerada como um indicador do vigor da cultura. Isso corrobora os resultados obtidos que demonstraram haver períodos de maior TCV relacionados com NDVI mais alto, reforçando o uso desse índice como uma ferramenta válida e eficiente para correlacionar a formação de biomassa com o vigor do pomar.

Partindo-se do princípio de que controle do vigor assegura o equilíbrio entre as fases vegetativa e reprodutiva da planta, seu manejo é de grande interesse para os produtores. Nesse sentido, identificar a variabilidade espacial e temporal do vigor utilizando o NDVI pode beneficiar a gestão da cultura e tornar homogênea a qualidade e a quantidade da produção (Bramley et al., 2011; Oldoni et al., 2021). A partir dos resultados preliminares obtidos neste trabalho, esse comportamento pode vir a ser mais bem explorado para a gestão da cultura de macieiras. Os resultados desta pesquisa indicam a relação entre o NDVI e o vigor, mas também apontam ser possível identificar padrões temporais de taxa de crescimento vegetativo ao longo do ciclo de desenvolvimento de biomassa em pomares de maçã a partir da TCV.

9 GERAÇÃO DE ZONAS DE MANEJO (ZM) COM BASE NO NDVI E NA PRODUTIVIDADE

Para avaliação da relação entre o NDVI e a produtividade, foram considerados mapas contendo de 2 a 5 ZM. Os resultados indicaram que os dados de NDVI obtidos nos estádios de brotação (BT), queda de pétalas (QP) e crescimento na leitura 7 (C3), que correspondem a 24, 38 e 59 DASD, respectivamente, são os mais importantes e correlacionados com a produtividade (Tabela 3). Isso sugere que esses são os períodos temporais que mais contribuem para geração de mapas de ZM com alta redução da variância da produtividade. Portanto, um mapa de previsão de produtividade gerado com quatro zonas de manejo com base nos dados de NDVI obtidos aos 24 dias tem a menor variância, sugerindo ser a melhor opção para tomada de decisões voltadas à gestão e ao manejo do pomar com maior chance de impacto na produtividade. Assim, a coleta de dados de NDVI nos demais estádios fenológicos tem pouco impacto na obtenção de ZM

Tabela 3. Porcentagem de redução de variância considerando a produtividade como variável alvo, para o agrupamento gerado por dados de NDVI em cada estádio fenológico ou combinação deles.

ZM	PV	BT	FL	QP	C1	C2	C3	CT	Todos	BT-QP-C3
DASD	17	24	31	38	46	53	59	-	-	-
2	0,0	24,0	7,1	26,1	0,0	0,4	31,3	1,0	0,0	19,8
3	9,0	25,2	22,6	26,1	21,8	3,6	32,1	19,6	12,7	27,6
4	27,0	33,4	24,3	0,0	21,8	17,0	34,5	19,8	14,9	32,3
5	8,3	18,5	11,1	0,0	5,5	13,5	20,0	15,1	30,4	9,2

ZM: Número de zonas de manejo; PV: ponta verde; BT: brotação; FL: início da floração (leitura 3); QP: queda de pétalas (leitura 4); C1: crescimento (leitura 5); C2: crescimento (leitura 6); C3: crescimento (leitura 7); CT: combinação de C1, C2 e C3; Todas: combinação de todos os estádios; BT-QP-C3 (combinação dos estádios de brotação, queda de pétalas e crescimento na leitura 7).

Figura 7. Exemplo de mapa de zonas de manejo (ZM) produzido a partir dos dados de 24 DASD.

visando à gestão da produtividade. A Figura 7 apresenta um exemplo aproximado da aplicação da metodologia para geração de zonas de manejo.

10 CONCLUSÃO

Este trabalho define um método rápido e relativamente pouco dispendioso para a identificação dos períodos de maior ou menor taxa de crescimento vegetativo em pomares de macieira por meio da avaliação da TCV, obtida a partir do NDVI, que pode auxiliar no processo de definição de zonas de manejo considerando a produtividade como variável alvo, além da própria gestão do pomar e da tomada de decisão de ações corretivas.

Os resultados indicam que existe um padrão temporal de crescimento vegetativo nos pomares avaliados, com maior crescimento vegetativo entre 24 e 40 dias após a superação da dormência. Os padrões de taxa de crescimento vegetativo podem ser relacionados com a caracterização temporal do vigor da cultura.

Para este estudo, os dados sugerem que o melhor mapa de zona de manejo relacionando NDVI com produtividade seria obtido pelo cruzamento das duas variáveis obtidas durante os 24 DASD (BT), gerando um mapa com quatro zonas.

REFERÊNCIAS

ASNER, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote Sensing Environmental**, v. 64, n. 3, p. 234-253, 1998.

BEST, S.; SALAZAR, F.; LEON, L. Crop load estimation model to optimize yield - quality ratio in apple orchards, Malus Domestica Borkh, Var. Royal Gala. **Journal of Information Technology in Agriculture**, v. 3, p, 11-18, 2008.

BONILLA, I.; MARTINEZ DE TODA, F.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A. Vine vigor, yield and grape quality assessment by airborne remote sensing over three years: analysis of unexpected relationships in cv. Tempranillo. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 13, n. 2, e0903, 2015.

BRAMLEY, R. G. V.; OUZMAN, J.; BOSS, P. K. Variation in vine vigour, grape yield and vineyard soils and topography as indicators of variation in the chemical composition of grapes, wine and wine sensory attributes. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. 17, n. 2, p. 217-229, 2011.

CANCELA, J. J.; FANDIÑO, M.; REY, B. J.; DAFONTE, J.; GONZÁLEZ, X. P. Discrimination of irrigation water management effects in pergola trellis system vineyards using a vegetation and soil index. **Agricultural Water Management**, v. 183, p. 70-77, 2017.

GAMON, J. A.; FIELD, C. B.; GOULDEN, M. L.; GRIFFIN, K. L.; HARTLEY, A. E.; JOEL, G.; PENUELAS, J.; VALENTINI, R. Relationships Between NDVI, Canopy Structure, and Photosynthesis in Three Californian Vegetation Types. **Ecological Applications**, v. 5, n. 1, p. 28-41, 1995.

GAVIOLI, A.; SOUZA, E. G.; BAZZI, C. L.; GUEDES, L. P. C.; SCHENATTO, K. Optimization of management zone delineation by using spatial principal components. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 127, p. 302-310, 2016.

HALL, A.; LAMB, D. W.; HOLZAPFEL, B. P., LOUIS, J. P. Within-season temporal variation in correlations between vineyard canopy and winegrape composition and yield. **Precision Agriculture**, v. 12, n. 1, p. 103-117, 2010.

HALL, A.; LOUIS, J.; LAMB, D. Characterising and mapping vineyard canopy using high-spatial-resolution aerial multispectral images. **Computers & Geosciences**, v. 29, n. 7, p. 813-822, 2003.

INMET. **Banco de dados meteorológicos**. Brasília, DF: INMET, 2022. Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/ Acesso em: 14 abr. 2022

NACHTIGALL, G. R.; DECHEN, A. R. Seasonality of nutrients in leaves and fruits of apple trees. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 5, p. 493-501, 2006.

OLDONI, H.; COSTA, B. R. S.; BOGNOLA, I. A.; SOUZA, C. R.; BASSOI, L. H. Homogeneous zones of vegetation index for characterizing variability and site-specific management in vineyards. **Scientia Agricola**, v. 78, n. 4, p. e20190243, 2021.

PALLARDY, S. G. **Physiology of woody plants.** New Jersey: Academic Press, 2010.

PETRI, J. L.; HAWERROTH, F. J.; LEITE, G. B.; COUTO, M.; FRANCESCATTO, P. Apple phenology in subtropical climate conditions. In: ZHANG, X. (org.). **Phenology and climate change**. Rijeka: InTech, 2012. p. 195-216.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. São Paulo: Oficina de Texto, 2012. p. 176.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: THIRD ERTS SYMPOSIUM, NASA SP-351. 1973, Washignton, DC. **Procceedings [...]**. Washignton, DC: NASA, 1973. p. 309-317.

SANTOS, M. S.; GEBLER, L.; SEBEM, E. Correlation between vegetation indexes generated at Vitis Vinifera L. and soil, plant and production parameters for emergency application in decision making. **Ciência Rural**, v. 52, n. 2, p. e20201037, 2022.

SINHA, R.; QUIRÓS, S.; SANKARAN, L.; KHOT, L. High resolution aerial photogrammetry based 3D mapping of fruit crop canopies for precision inputs management. **Information Processing in Agriculture**, v. 9, n. 1, p. 11-23, 2021.

VÉLEZ, S.; RANÇON, F.; BARAJAS, E.; BRUNEL, G.; RUBIO, J. A.; TISSEYRE, B. Potential of functional analysis applied to Sentinel-2 time-series to assess relevant agronomic parameters at the within-field level in viticulture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 194, p. 106726, 2022.

VIAU, A. A.; JANG, J. D.; PAYAN, V.; DEVOST, A.The use of airborne LIDAR and multispectral sensors for orchard trees inventory and characterization. In: 7TH INFORMATION AND TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE FRUIT AND VEGETABLE PRODUCTION, 2005, Montpellier. **Anais [...]**, Montpellier: Fruit, Nut and Vegetable Production Engineering Symposium, 2005.

ZARCOTEJADA, P.; BERJÓN, A.; LÓPEZ-LOZANO, R.; MILLER, J. R.; MARTÍN, P.; CACHORRO, V.; GONZÁLEZ, M. R.; FRUTOS, A. Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 99, n. 3, p. 271-287, 2005.

58 Uso de metadados para a geração de mapas de zona de manejo de pragas em pomar: um estudo de caso

Use of metadata to generate pest management zone maps in orchards: a case study

Luciano Gebler[1], Eduardo Antonio Speranza[2], Célia Regina Grego[3]

[1] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br*
[2] *Pesquisador, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, eduardo.speranza@embrapa.br*
[3] *Pesquisadora, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, celia.grego@embrapa.br*

RESUMO

Grande parte da fruticultura no Brasil dispõe de algum tipo de controle de rastreabilidade, necessitando de coleta e manutenção de algum tipo de dado sobre o processo produtivo. Esse controle é uma excelente oportunidade de agregar valor a um conjunto de dados que, na maioria dos casos, é armazenado ou descartado sem uma exploração mais aprofundada. Em tempos de agricultura de precisão e digital, o uso alternativo de dados disponíveis, coletados de fontes indiretas, pode contribuir para a economicidade do processo produtivo, bastando um novo olhar sobre uma valiosa fonte de informação. O controle de pragas por manejo integrado é uma prática comumente utilizada em pomares de maçãs no sul do Brasil e é uma importante ferramenta que impacta diretamente na melhoria da qualidade e no aumento da produtividade. O uso de metadados originados de processos de certificação da qualidade e rastreabilidade dos pomares permite analisar as tendências históricas da ocorrência de algumas pragas, auxiliando na tomada de decisão e no gerenciamento da produção. Neste trabalho, o objetivo foi analisar a incidência de diferentes tipos de pragas aéreas ao longo de três safras em um pomar comercial de maçãs do município de Vacaria-RS, a partir de dados coletados para outras finalidades. Com isso, foi possível gerar mapas de regiões com diferentes níveis de susceptibilidade a pragas utilizando métodos de identificação da variabilidade espacial, como a geoestatística e os algoritmos de agrupamento específicos para dados de contagem. O exemplo do processo de análise descrito neste trabalho pode servir como auxílio para análises de risco futuras, com base em dados indiretos. Também demonstra o potencial e o valor dos dados coletados e atualmente armazenados para outras finalidades, mas que podem ser reutilizados para a adoção da fruticultura de precisão, trazendo benefícios de manejo e redução de custos ao produtor.

Palavras-chave: fruticultura de precisão; rastreabilidade; banco de dados.

ABSTRACT

A large part of fruit growing in Brazil has some type of traceability control, requiring the collection and maintenance of some type of data about the production process. This control is an excellent opportunity to add value to a data set that, in most cases, is stored or discarded without further exploration. In times of precision and digital agriculture, the alternative use of available data, collected from indirect sources, can contribute to the economy of the production process, simply by taking a new look at a valuable source of information. Pest control through integrated management is a practice commonly used in apple orchards in southern Brazil and is an important tool that directly impacts quality improvement and increased productivity. The use of metadata from orchard quality and traceability certification processes enable to analyze historical trends in the occurrence of some pests, assisting in decision-making and production management. In this work, the objective was to analyze the incidence of different types of aerial pests over three harvests in a commercial apple orchard in Vacaria, RS, Brazil, based on data collected for other purposes. With this, it was possible to generate maps of regions with different levels of susceptibility to pests using methods for identifying spatial variability such as geostatistics and specific grouping algorithms for count data. The example of the analysis process described in this work can help future risk analyzes based on indirect data. It also demonstrates the potential and value of data collected and currently

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000032

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

stored for other purposes, but they can be reused for the adoption of precision fruit growing, bringing management benefits and cost reduction to the producer.

Keywords: precision fruit crop; traceability; database.

1 INTRODUÇÃO

A exploração econômica nas cultivares de macieira expandiu significativamente nos últimos anos, principalmente nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, sendo a produção autossuficiente para o consumo interno, além das exportações para mercados altamente exigentes. Diante desse cenário, empresas produtoras caminham em direção à produção eficiente com qualidade e sustentabilidade, minimizando os efeitos negativos à saúde e ao meio ambiente pela redução de utilização de agrotóxicos (Fioravanço; Santos, 2013).

Com o aumento de produtividade e a exigência em qualidade da fruta, houve a necessidade da adoção de um sistema que auxiliasse no gerenciamento e manejo das áreas, surgindo então a Produção Integrada de Maçãs (PIM), programa de certificação de qualidade que exigia a implantação de um sistema para auxílio na tomada de decisões relativas ao uso de agrotóxicos com base no monitoramento de pragas (Kovaleski; Ribeiro, 2002). Nesse contexto, nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, atualmente responsáveis por cerca de 97% da produção nacional de maçãs (Lazzarotto, 2018), a adoção da PIM é uma realidade mesmo que, devido ao custo da fase de certificação por terceiros, poucos produtores finalizem o processo com o selo, apesar de a quase totalidade do setor produtivo seguir o protocolo técnico na íntegra.

No caso da PIM, esta proporciona ao produtor uma atualização dinâmica da incidência de pragas na sua área de produção, facilitando o controle das populações e obrigando ainda que os produtores armazenem seus dados de monitoramento por um período mínimo de cinco anos, caso haja necessidade de auditorias extras pelo programa. A partir dessa exigência, os produtores passaram a ter a disponibilidade de planilhas de dados geográficos e temporais em seus pomares (Fioravanço; Santos, 2013). Durante a safra, estes dados são normalmente utilizados semanalmente para manejo de pragas, mas, por falta de ferramentas ou orientação, acabam sem utilização posterior, sendo estocados tanto de maneira física (cadernos de campo) como virtual (planilhas eletrônicas).

Outros sistemas de certificação da qualidade além da PIM são utilizados pelo setor, como a GlobalGAP ou BRC (*British Retail Consortium*), que também demandam as mesmas regras de coleta e armazenamento de dados para processos de auditoria, resultando em um enorme potencial para a geração de informações indiretas que podem apoiar o gerenciamento do setor produtivo por meio da interpretação dos novos resultados pela utilização de técnicas de fruticultura de precisão.

Além destes sistemas de certificação comercial, a partir da publicação da Instrução Normativa Conjunta nº 02/2018 pelo MAPA e pela ANVISA, o processo de rastreabilidade de frutas e hortaliças se tornou obrigatório no Brasil, exigindo que os produtores coletem e mantenham uma série de dados sobre suas culturas para fins de eventuais auditorias. Este banco de dados, atualmente coletado com objetivos legais, também pode servir para fins de apoio à gestão da propriedade por meio de seu uso na forma de metadados.

A incidência de pragas em uma área produtora de maçãs é verificada com a instalação de armadilhas para amostragem em locais específicos em cada safra. Com a obtenção desses dados ao longo dos anos, é possível identificar regiões mais susceptíveis e estabelecer o manejo adequado para o controle da população de pragas. Consequentemente, essas ações direcionadas podem favorecer o investimento em áreas nas quais há possibilidade de serem obtidos frutos de melhor qualidade. Entretanto, para que esses dados sejam transformados em informações acessíveis e facilmente interpretáveis por parte dos produtores e órgãos reguladores, é conveniente o uso de técnicas computacionais, como a inteligência artificial. Nesse contexto, a utilização de algoritmos de aprendizado de máquina para a predição de infestação de pragas e doenças na agricultura é algo que vem sendo bastante investigado na literatura. Na fruticultura, especialmente para maçãs, os trabalhos ainda são bastante recentes, como no caso de Boniecki et al. (2015), Brunelli et al. (2019) e Wrzesień et al. (2019), que desenvolveram métodos de monitoramento direto das pragas através da coleta de dados específicos para seus modelos.

Diferentemente das aplicações acima, mapas de distribuição espacial de pragas podem ser obtidos a partir de dados coletados em armadilhas instaladas em locais específicos da lavoura. Nesse caso, técnicas que identificam a variabilidade espacial podem ser muito úteis para garantir melhor precisão no mapeamento, como a utilização da ferramenta de análise

geoestatística. Por se tratarem de dados não rotulados previamente, a classificação desses mapas, considerando diferentes classes de incidência de pragas, pode ser realizada a partir de algoritmos de aprendizado de máquina não supervisionados, conhecidos como algoritmos de agrupamento. Esses algoritmos têm como principal objetivo agrupar amostras de dados de maneira natural, ou seja, fazendo com que pares de amostras mais similares com relação ao domínio da aplicação sejam alocadas em um mesmo grupo, e pares de amostras menos similares sejam alocadas em grupos distintos (Jain; Dubes, 1988).

Portanto, o objetivo deste trabalho foi demonstrar o potencial da reutilização de dados indiretos por meio de técnicas de geoestatística e algoritmo de agrupamento, para analisar a incidência de diferentes tipos de pragas aéreas ao longo de três safras em um pomar comercial de maçãs do município de Vacaria-RS, permitindo a construção de mapas de risco com diferentes níveis de susceptibilidade às pragas como apoio à tomada de decisão.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos em um pomar comercial de macieiras (*Malus domestica*) da empresa Agropecuária Schio LTDA, em Vacaria, Rio Grande do Sul, Brasil (50°49'13''O; 28°28'43''S), com área total de abrangência de aproximadamente 305 ha, com cultivares Gala, Fuji e seus respectivos clones. A empresa segue normas específicas de Manejo Integrado de Pragas (MIP), aplicando agrotóxicos somente em locais nos quais o nível de pragas obtido, conforme as informações coletadas das armadilhas, é alto o suficiente para justificar tal aplicação. Foram disponibilizadas 248 armadilhas georreferenciadas com GPS RTK (Figura 1a), capazes de capturar as pragas lagarta-enroladeira (*Bonagota salubricola*) e mariposa-oriental (*Grapholita molesta*), com 94 armadilhas cada (Figura 1b), e mosca-das-frutas (*Anastrepha fraterculos*), com 60 armadilhas (Figura 1c).

As contagens de ocorrências realizadas nas armadilhas referenciadas na Figura 1a referem-se às safras de 2011/2012, 2012/2013 e 2013/2014. Candeia et al. (2016) realizaram em seu trabalho um pré-processamento de binarização desse mesmo conjunto de dados, atribuindo valor 1 para amostras com um número acima do mínimo e valor 0 para amostras com um número abaixo do mínimo de ocorrências determinadas para a utilização de agrotóxicos, segundo as normas do MIP utilizado pela empresa. Entretanto, para este trabalho, foram utilizados os valores absolutos de contagem, com o intuito de viabilizar a utilização de algoritmos de agrupamento de dados para realização das análises.

2.1 Análise Geoestatística

Inicialmente, a partir dos dados de incidência de pragas, foi realizada análise geoestatística para verificar a existência de dependência espacial por meio do cálculo e ajuste dos semivariogramas escalonados ajustados às funções de melhor correlação. O escalonamento dos semivariogramas foi utilizado conforme Vieira et al. (2010), com a finalidade de elaborar todos os semivariogramas na mesma escala de semivariância e distância para todas as variáveis que apresentam a mesma unidade de medida e que foram amostradas na mesma área de estudo. Os parâmetros de depen-

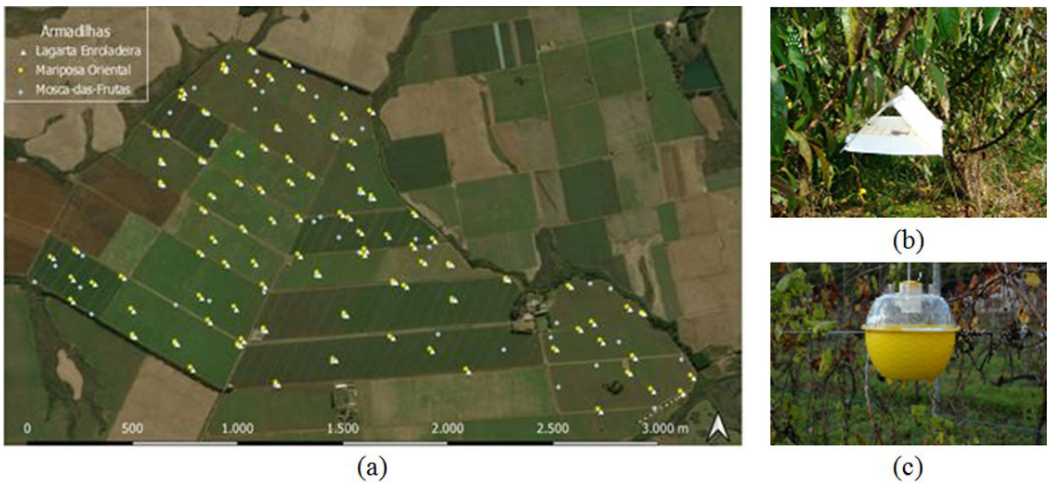


Figura 1. Área de estudo (a) e localização das armadilhas para as espécies de pragas lagarta-enroladeira, mariposa-oriental e mosca-das-frutas, e tipos de armadilhas utilizadas no campo para controle de lagarta-enroladeira e mariposa-oriental (b), além de mosca-das-frutas (c).

dência efeito pepita (Co), variância estrutural (C1) e alcance (a) foram utilizados na interpolação por krigagem. Os semivariogramas escalonados foram ajustados ao modelo esférico que melhor representou a variabilidade espacial das variáveis. A partir dos semivariogramas ajustados, os dados foram interpolados utilizando krigagem ordinária, que garantiu a interpolação sem tendência e com variância mínima, permitindo a construção de mapas de cada safra utilizando o *software* QGIS (QGIS, 2021).

2.2 Aprendizado de máquina não supervisionado

A análise geoestatística realizada permitiu identificar a presença de variabilidade espacial na área de estudo com relação à incidência de pragas, considerando os dados coletados nas três safras. A análise com uso de aprendizado de máquina permitiu a verificação da possibilidade de particionamento da área de estudo em regiões com maior e menor incidência de pragas, tomando como entrada os dados coletados nas três safras.

Devido ao fato de a aplicação deste trabalho utilizar um tipo específico de dados, assim como na análise geoestatística, foram utilizados algoritmos de agrupamento específicos para dados de contagem (não contínuos). Para identificação de qual seria o algoritmo ideal para gerar mapas de incidência para cada uma das pragas, foi utilizada a função *optCluster*, pertencente ao pacote de mesmo nome, disponível para o *software* R (Sekula et al., 2017). Essa função permite verificar, a partir dos dados e técnicas estatísticas que identificam índices de estabilidade, conectividade e homogeneidade, qual o algoritmo ideal para agrupar as amostras, considerando um total de seis algoritmos específicos para dados de contagem, bem como a quantidade ideal de grupos para classificar o conjunto de dados. Os algoritmos do recozimento determinístico (Ueda; Nakano, 1998) e do recozimento simulado (Van Laarhoven; Aarts, 1987), ambos utilizando modelo negativo binomial para contagem de dados e disponíveis no pacote *MBCluster.Seq* do software R (Si et al., 2014), foram os que apresentaram maior aderência aos conjuntos de dados utilizados. Esses algoritmos são variantes do algoritmo da maximização da expectativa (EM) (Moon, 1996) e, por se basearem em modelos tradicionais de distribuições probabilísticas para dados de contagem, se tornam adequados para simular agrupamentos para conjuntos de dados de incidência de pragas. Entretanto, como esses algoritmos são inicializados a partir de centroides aleatórios, em algum momento pode ser que o resultado convirja para um mínimo local e não global. Desse modo, cada algoritmo escolhido para cada conjunto de dados foi executado pelo menos dez vezes, em que o resultado escolhido foi aquele que apresentou a menor soma dos erros quadráticos, ou seja, a menor soma das distâncias de cada amostra com relação ao centro do grupo ao qual ela foi associada. Detalhes mais aprofundados sobre a utilização dessas técnicas nesse tipo de trabalho podem ser encontrados em Speranza et al. (2022).

Com o intuito de realizar uma comparação dos mapas obtidos por safra a partir de técnicas de geoestatística com o mapa final de incidência de pragas obtido a partir de análise de agrupamento, foi utilizada a estatística do coeficiente de *Kappa* (Mchugh, 2012). Esse coeficiente é utilizado em análise de agrupamento como um critério de validação externa, ou seja, para avaliar a concordância entre rótulos atribuídos para duas soluções distintas. O coeficiente de *Kappa* retorna valores entre 0 e 1, em que valores próximos de 1 indicam alta concordância entre os agrupamentos comparados, e valores próximos de 0 indicam baixa concordância.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores mínimos, máximos e medianos de incidência das três pragas em cada uma das três safras, bem como seus coeficientes de variação e desvios padrão, podem ser visualizados na Tabela 1. Esses dados mostram dificuldades no controle da praga lagarta-

Tabela 1. Valores mínimos (mín), máximos (máx), medianos (med), desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV) (%) de incidência das três pragas em macieira em três safras.

Praga / safra	2011/2012					2012/2013					2013/2014				
	mín	máx	med	DP	CV	mín	máx	med	DP	CV	mín	máx	med	DP	CV
Lagarta-enroladeira	0	2	0	0,56	132	0	12	0	2,75	186	0	9	1	2,12	134
Mariposa-oriental	0	2	0	0,34	451	0	6	0	1,05	329	0	1	0	0,02	682
Mosca-das-frutas	2	12	7	141,50	564	5	19	9,5	154,02	513	1	23	6	167,42	592

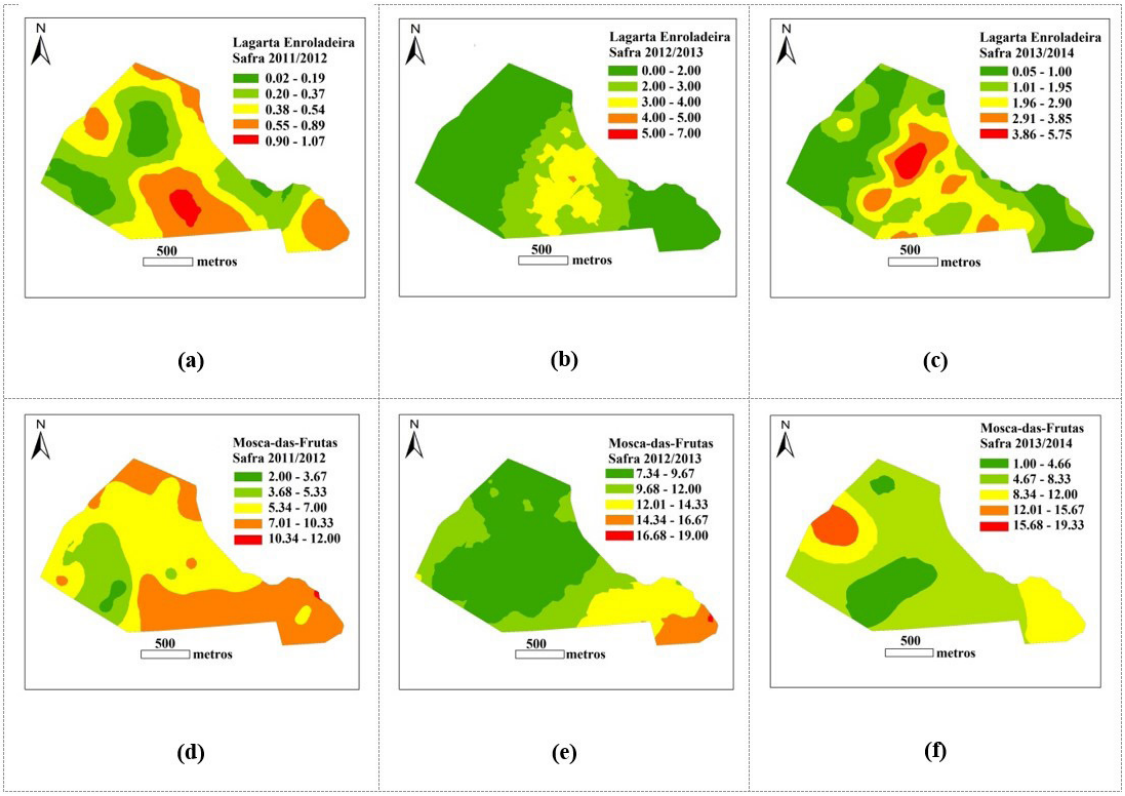


Figura 2. Mapas de evolução de ocorrências das pragas obtidos a partir de interpolação por krigagem para lagarta-enroladeira: (a) safra 2011/2012, (b) safra 2012/2013 e (c) safra 2013/2014, e para mosca-das-frutas: (d) safra 2011/2012, (e) safra 2012/2013 e (f) safra 2013/2014.

-enroladeira e, principalmente, da praga mosca-das-frutas, com aumento da incidência ao longo dos anos. A praga mariposa-oriental apresentou um pequeno aumento de incidência na safra 2012/2013, o que praticamente não influenciou no resultado final deste experimento.

Foram gerados semivariogramas escalonados para as três pragas considerando as três safras estudadas, sendo detectada dependência espacial somente para a lagarta-enroladeira e para a mosca-das-frutas com ajustes esféricos, eliminando o estudo da mariposa-oriental dos passos seguintes, nesta análise. Os mapas elaborados a partir de valores interpolados por krigagem para as variáveis que apresentaram dependência espacial encontram-se na Figura 2.

Para a praga lagarta-enroladeira, é possível perceber uma maior incidência na região central da área experimental, considerando as safras mapeadas (Figuras 2a, 2b e 2c). Nos mapas para a evolução da mosca-das-frutas, houve predominância para maiores incidências localizadas na parte inferior direita da área (Figuras 2d, 2e e 2f). Isso indica que essas regiões devem ser manejadas ou investigadas diferentemente das demais regiões da área em relação à ocorrência dessas pragas. A geração do mapa parte do princípio de que a distribuição da praga na lavoura não ocorre ao acaso, mas segue uma distribuição dependente do espaço e da época de cada avaliação realizada em campo, o que direciona a tomada de decisão para o controle da praga no campo.

No que diz respeito ao agrupamento de dados para obtenção de mapas com diferentes regiões de incidência de pragas, os dados de incidência, nas três safras, das pragas lagarta-enroladeira e mosca-das-frutas foram agrupados utilizando, respectivamente, os algoritmos do recozimento determinístico e do recozimento simulado, ambos com base na distribuição negativa binomial para a contagem de dados. Em ambos os casos, os melhores agrupamentos foram obtidos considerando a subdivisão em dois grupos. Devido à baixa incidência de ocorrência presente nos dados nas três safras, não foi possível encontrar algoritmo ideal para separar as incidências da praga mariposa-oriental em grupos e, desse modo, o conjunto de dados específico dessa praga foi descartado, assim como já havia ocorrido na análise geoestatística.

A partir de análises de coesão intragrupos e separação intergrupos, e considerando a existência de pontos não coincidentes de localização das armadilhas instaladas para as duas pragas, foi realizada uma fusão simples entre os agrupamentos, unindo as amostras do grupo de menor incidência para as duas

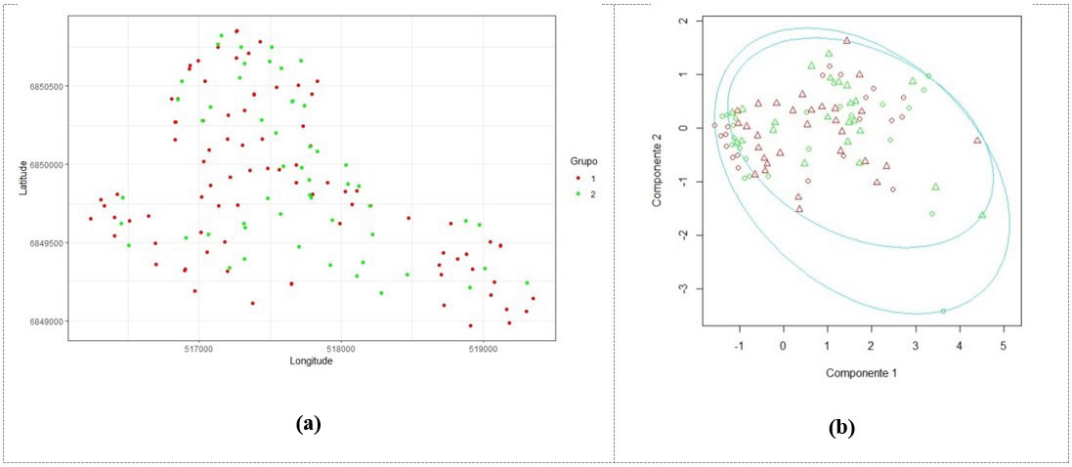


Figura 3. Agrupamento resultante da fusão dos agrupamentos gerados pelo *clusterplot* do *software* R: (a) agrupamento (2 grupos) exibidos em forma de mapa; (b) visualização dos grupos no espaço bidimensional (amostras nos diferentes grupos representadas por triângulos ou círculos).

pragas em um único grupo (valores medianos 1 e 8), sendo as amostras com maior incidência (valores medianos 4 e 12,5) unidas em outro grupo (Figura 3a). Entretanto, esses novos grupos, apesar de possuírem valores medianos bem distintos (1 e 5, respectivamente), não aparentam estar bem separados de uma maneira geral, pois existem muitos pontos de intersecção entre eles, quando visualizados a partir das duas componentes principais (Figura 3b). Apesar de este resultado indicar certa dificuldade em separar a área de estudo em duas regiões únicas com maior e menor incidência geral de pragas, é possível observar uma área contínua de incidência acima da média para ambas as pragas, na região central do mapa (Figura 3a), cujas amostras estão representadas pelos triângulos na única região de não intersecção entre os grupos (Figura 3b). Adicionalmente, na parte norte do mapa, também é possível identificar uma região contínua de incidência de pragas, influenciada principalmente pela praga mosca-das-frutas.

A partir dos dados agrupados, conforme a Figura 3a, foram utilizadas ferramentas para transformação de amostras pontuais em polígonos, disponíveis no *software* QGIS. Com isso, foi possível gerar um mapa geral contínuo de distribuição espacial das pragas da área de estudo, considerando a análise realizada a partir das três safras (Figura 4).

A partir da Figura 4, as regiões em vermelho (Grupo 1) são identificadas como de alta incidência de pragas, com valores medianos de cinco incidências por safra, e as regiões em verde (Grupo 2) são identificadas como de baixa incidência de pragas, com valores medianos de uma incidência por safra. Assim, da mesma forma que nos gráficos bidimensionais da Figura 3, é possível identificar uma região central mais contínua e outra região menor, localizada ao norte do mapa, com alta incidência de pragas.

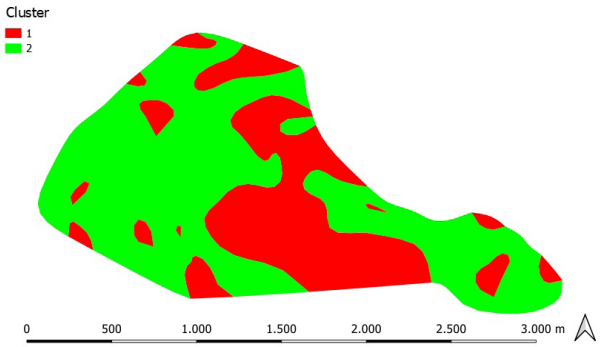


Figura 4. Mapa sugerido para gestão diferenciada de população de pragas, considerando a incidência observada em três safras das pragas lagarta-enroladeira e mosca-das-frutas. Áreas com alta incidência de pragas estão representadas em vermelho (Grupo 1) e áreas com baixa incidência de pragas estão representadas em verde (Grupo 2).

Tabela 2. Coeficiente de correlação Kappa para comparação entre mapa de incidência de pragas único, obtido a partir de análise de agrupamento, com mapas individuais obtidos a partir de geoestatística para cada praga em cada safra.

Praga / Safra	2011/2012	2012/2013	2013/2014
Lagarta-enroladeira	0,23	0,48	0,26
Mosca-das-frutas	0,36	0,47	0,35

Com o objetivo de verificar a concordância do mapa obtido a partir de análise de agrupamento (Figura 4) com os mapas obtidos a partir de geoestatística (Figura 2), foi utilizado o coeficiente de correlação *Kappa*. Para tanto, as cinco classes de cada um dos seis mapas da Figura 2 foram convertidas em apenas

duas classes (com maior e menor incidência de pragas), considerando a divisão de valores a partir de algoritmo de quebras naturais (Jenks, 1967). A Tabela 2 exibe os resultados de correlação obtidos com o coeficiente de correlação *Kappa*.

Seguindo a classificação utilizada para o critério de correlação *Kappa* (Viera; Garrett, 2005), para ambas as pragas, a correlação com o mapa geral obtido a partir de análise de agrupamento pode ser considerada razoável, para as safras de 2011/2012 e 2013/2014, e moderada, para a safra 2012/2013. O fato de não existirem correlações com valores de *Kappa* mais próximos de 1, que seriam classificadas como substanciais ou quase perfeitas, mostra que o algoritmo de agrupamento utilizado conseguiu fornecer uma solução mais geral que considera, de maneira justa, a dinâmica temporal de infestação de pragas, o que pode ser observado nos mapas individuais obtidos a partir da geoestatística. Adicionalmente, o não aparecimento de valores abaixo de 0,20 para o índice Kappa também indica que nenhum dos mapas individuais mostrou pouca correlação com a solução unificada.

A partir de novas análises georreferenciadas de fatores relacionados ao solo, à cultura e ao microclima, será possível investigar melhor as causas da incidência maior de pragas nos locais exibidos no mapa da Figura 4, priorizando um manejo mais específico como forma de reduzir os riscos de aumento da população de pragas nas safras seguintes. Adicionalmente, este conhecimento referente à variabilidade temporal do comportamento das pragas analisadas permite, ao gestor da propriedade ou ao tomador de decisão, definir melhor as estratégias de controle de pragas, buscando o manejo dos pomares com base no risco histórico das áreas, principalmente em situações nas quais há limitações de recursos ou mão de obra. Assim, é possível orientar maiores esforços para as áreas de maior risco (zonas vermelhas) em relação àquelas de menor risco (zonas verdes), e, à medida que os dados forem se acumulando, obter mais clareza a respeito das causas das variabilidades espacial e temporal do comportamento dos insetos naquela área.

A abordagem utilizada neste trabalho – apesar de os mapas contínuos obtidos a partir de interpolação de dados por krigagem não terem sido utilizados como informações para os algoritmos de agrupamento – é muito utilizada no delineamento de zonas de manejo. Portanto, essa metodologia pode ser explorada para reduzir o aparecimento das pequenas áreas com alta incidência de pragas observadas no mapa sugerido para gestão diferenciada de população de pragas

4 CONCLUSÕES

O exemplo apresentado demonstrou que o uso de dados indiretos armazenados pelo produtor ainda podem gerar informações valiosas para a sua tomada de decisão. Uma vez que a coleta e o armazenamento de dados de incidência de pragas são obrigatórios para os programas de certificação, sua aplicação na forma de metadados pode servir como base a um processo de análise de risco, trazendo benefícios de manejo e redução de custos ao produtor. A análise geoestatística permitiu verificar a presença de infestações de determinadas pragas na área de estudo, sendo da praga lagarta-enroladeira na região central e da praga mosca-das-frutas na região inferior direita. Considerando a análise de agrupamento, foi possível identificar regiões com incidência acima da média para ambas as pragas, ao mesmo tempo, principalmente na região central do mapa.

REFERÊNCIAS

Boniecki, P.; Koszela, K.; Piekarskaboniecka, H.; Weres, J.; Zaborowicz, M.; Kujawa, S.; Majewski, A.; Raba, B. Neural identification of selected apple pests. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *110*, p. 9-16, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2014.09.013.

Brunelli, D.; Albanese, A.; d'Acunto, D.; Nardello, M. Energy neutral machine learning based iot device for pest detection in precision agriculture. **IEEE Internet of Things Magazine**, v. *2*, n. 4, p. 10-13, 2019. DOI: http://doi.org/10.1109/IOTM.0001.1900037.

Candeia, M. G.; Gebler, L.; Bueno, M. B. Uso da AP no gerenciamento de metadados de longo prazo de monitoramento de pragas da macieira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO (CONBAP), 2016, Goiânia. **Anais** [...]. Goiânia: AsBraAP, 2016.

Fioravanço, J. C.; Santos, R. S. S. **Maçã:** o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 239 p. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

Jain, A. K.; Dubes, R. C. **Algorithms for clustering data**. Londres: Prentice-Hall, Inc., 1988.

Jenks, G. F. The data model concept in statistical mapping. **International Yearbook of Cartography**, v. *7*, p. 186-190, 1967.

Kovaleski, A.; Ribeiro, L. G. **Manejo de pragas na produção integrada da maçã**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2002. p. 8. (Embrapa Uva e Vinho. Circular Técnica, 34).

Lazzarotto, J. J. **Indicadores econômicos e financeiros em sistemas típicos de produção de maçã no Brasil.** Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2018.

Mchugh, M.L. Interrater reliability: the kappa statistic. **Biochemia Medica**, v. *22*, n. 3, p. 276-282, 2012. DOI: http://doi.org/10.11613/BM.2012.031.

Moon, T. K. The expectation-maximization algorithm. **IEEE Signal Processing Magazine**, v. *13*, n. 6, p. 47-60, 1996. DOI: http://doi.org/10.1109/79.543975.

QGIS. 2021. Disponível em: https://qgis.org. Acesso em: 26 jul. 2021.

Sekula, M.; Datta, S.; Datta, S. optCluster: an R package for determining the optimal clustering algorithm. **Bioinformation**, v. *13*, n. 3, p. 101-103, 2017. DOI: http://doi.org/10.6026/97320630013101.

Si, Y.; Liu, P.; Li, P.; Brutnell, T. P. Model-based clustering for RNA-seq data. **Bioinformatics (Oxford, England)**, v. *30*, n. 2, p. 197-205, 2014. DOI: http://doi.org/10.1093/bioinformatics/btt632.

Speranza, E. A.; Grego, C. R.; Gebler, L. Analysis of pest incidence on apple trees validated by unsupervised machine learning algorithms. **Engenharia na Agricultura**, v. *30*, p. 63-74, 2022. DOI: http://doi.org/10.13083/reveng.v30i1.12919.

Ueda, N.; Nakano, R. Deterministic annealing EM algorithm. **Neural Networks**, v. *11*, n. 2, p. 271-282, 1998. DOI: http://doi.org/10.1016/S0893-6080(97)00133-0.

Van Laarhoven, P. J. M.; Aarts, E. H. L. **Simulated annealing:** *theory and applications.* Dordrecht: Springer, 1987. DOI: http://doi.org/10.1007/978-94-015-7744-1.

Vieira, S. R.; Garcia, M. A. G.; González, A. P.; Siqueira, G. M. Variabilidade espacial e temporal do teor de água do solo sob duas formas de uso. **Bragantia**, v. *69*, n. 1, p. 181-190, 2010. DOI: http://doi.org/10.1590/S0006-87052010000100023.

Viera, A. J.; Garrett, J. M. Understanding interobserver agreement: the kappa statistic. **Family Medicine**, v. *37*, n. 5, p. 360-363, 2005.

Wrzesień, M.; Treder, W.; Klamkowski, K.; Rudnicki, W. R. Prediction of the apple scab using machine learning and simple weather stations. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *161*, p. 252-259, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.026.

59

Revisão sobre modelagem da avaliação do rendimento considerando a influência da variabilidade temporal em espécies frutíferas perenes

Review on yield evaluation modeling considering the influence of temporal variability in perennial fruit crops

Luciano Gebler[1], Renata Bulling Magro[2], Eduardo Antonio Speranza[3]

[1] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Vacaria (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br*
[2] *Doutoranda, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), Brasil, renatamagro4@gmail.com*
[3] *Analista, Embrapa Agricultura Digital, Unicamp, Barão Geraldo, Campinas (SP), eduardo.speranza@embrapa.br*

RESUMO

Um objetivo importante da fruticultura de precisão é compreender e gerenciar os padrões de variações espaciais e temporais do rendimento. A adoção de tecnologias para coleta e avaliação de dados obtidos em campo ao longo de períodos produtivos pode contribuir para o estabelecimento de padrões que auxiliem no manejo da área agrícola. O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão narrativa da literatura sobre os métodos utilizados para a avaliação do rendimento de culturas frutíferas perenes, destacando as atuais limitações metodológicas e as perspectivas de desenvolvimento. A partir dos trabalhos revisados, foi possível estabelecer distinções entre estratégias de avaliação, tipos de variáveis, classes de modelagem e modelos utilizados. Por fim, são apresentados possíveis caminhos para pesquisas futuras no âmbito da avaliação do rendimento de culturas perenes, que podem permitir maior eficiência no processo de tomada de decisão e no manejo das culturas visando ao aumento da produtividade.

Palavras-chave: fruticultura de precisão; previsão agrícola; modelagem estocástica; suporte à decisão; banco de dados.

ABSTRACT

An important objective of precision fruit growing is to understand and manage the patterns of spatial and temporal variations in yield. The adoption of technologies for collecting and evaluating data obtained in the field over productive periods can contribute to the establishment of standards that aid in the management of the agricultural area. The objective of this work was to carry out a narrative review of the literature on the methods used to evaluate the yield of perennial fruit crops, highlighting the current methodological limitations and development prospects. From the work reviewed, it was possible to establish distinctions between evaluation strategies, types of variables, modelling classes and models used. Finally, possible paths for future research in the field of the perennial crop yield evaluation are presented, which can allow for greater efficiency in the decision-making process and in crop management aiming at increasing yield.

Keywords: precision fruit growing; agricultural forecasting; stochastic modelling; decision support; database.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000045

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

O rendimento é uma variável de final do ciclo de produção agrícola que integra os efeitos cumulativos do clima e das práticas de manejo ao longo desse período, podendo ser influenciado por fatores endógenos ou exógenos à planta (Fisher, 2000). No entanto, no que se refere ao cultivo de espécies frutíferas perenes, o resultado final da produção não é influenciado apenas pelas interferências anuais desses fatores, mas pelo somatório de interferências ocorridas ao longo do período de vida completo da espécie vegetal, o qual, a exemplo da macieira, pode variar entre 20 e 25 anos (Lordan et al., 2018). Algumas ações, como as práticas de poda e de raleio, podem afetar o desenvolvimento produtivo por períodos maiores do que uma safra, visto que o impacto produzido sobre a planta em um ciclo de produção pode se estender pelo menos até o ciclo seguinte.

A influência de ciclos anteriores no rendimento atual de frutíferas perenes é um fator que aumenta a complexidade do sistema, conforme pode ser observado pela produção irregular entre os anos de cultivo (Dambreville et al., 2013). Ainda, aspectos de variabilidade espacial e temporal relacionados à produção apresentam forte correlação com um processo estocástico, no qual pelo menos uma variável do sistema se comporta de forma aleatória no decorrer do tempo. Esses fatores podem contribuir para que a modelagem de avaliação do rendimento com razoável tempo de antecedência da colheita seja uma tarefa desafiadora.

Contudo, no escopo da fruticultura de precisão, diferentes métodos computacionais constituem ferramentas valorosas para a avaliação do rendimento (Laurent et al., 2021). Atualmente, existe uma grande procura por modelos matemáticos capazes de fornecer quantificações antecipadas do rendimento, os quais podem auxiliar na definição de zonas de manejo temporalmente variáveis quanto à produtividade, visando aumentar a eficiência das áreas cultivadas (Sirsat et al., 2019). Dessa forma, o objetivo desta revisão foi realizar uma análise exploratória dos principais métodos de avaliação do rendimento abordados na literatura, além de propor recomendações em termos de desafios científicos com relação à modelagem preditiva em sistemas de cultivo perenes, considerando a inclusão do aspecto temporal.

2 ESTRATÉGIAS DE AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DE ÁRVORES FRUTÍFERAS PERENES

A partir dos trabalhos revisados, diferentes abordagens metodológicas de avaliação do rendimento foram identificadas e categorizadas de acordo com a estratégia de avaliação (estimativa ou previsão), a classe de variável (direta ou indireta), a classe de modelagem (estocástica ou mecanística) e, por fim, com o modelo utilizado (linear, aprendizado de máquina ou aprendizado profundo) (Figura 1).

Em geral, o processo de modelagem produzirá ou uma estimação ou uma previsão do rendimento agrícola. Assim, considerando essas duas estratégias de avaliação, realizou-se uma análise das principais palavras e expressões de indexação dos trabalhos (Figura 2). Além de "rendimento", as expressões "redes neurais" e "sensoriamento remoto" destacaram-se como tópicos de maior interesse. As expressões "processamento de imagens" e "aprendizado profundo", e as palavras "floração" e "detecção" foram encontradas em trabalhos relacionados à estimativa do rendimento. A expressão "longo prazo" apareceu em um trabalho com o objetivo de previsão.

A estimativa do rendimento é uma forma mais simples de avaliação, a qual é realizada na mesma unidade de medida, de tempo e de espaço que a medição e a amostragem dos parâmetros de entrada. Dessa forma, na modelagem de estimativa, são preferencialmente utilizadas variáveis diretas obtidas por meio de amostragem em campo para quantificar objetivamente os

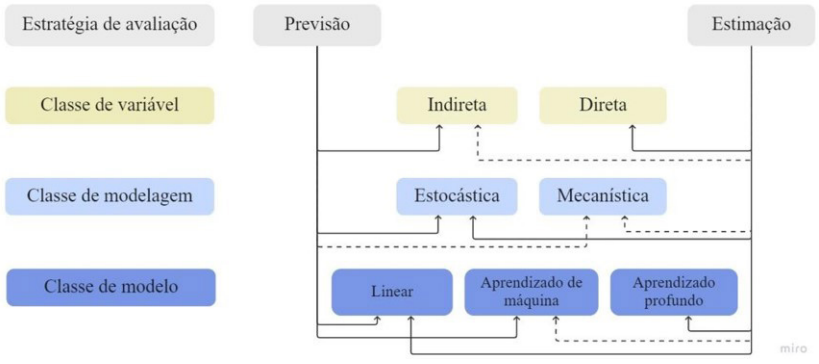


Figura 1. Fluxograma das principais estratégias utilizadas para a avaliação do rendimento em culturas perenes. *Linha contínua significa maior frequência de utilização; linha tracejada significa menor frequência de utilização.

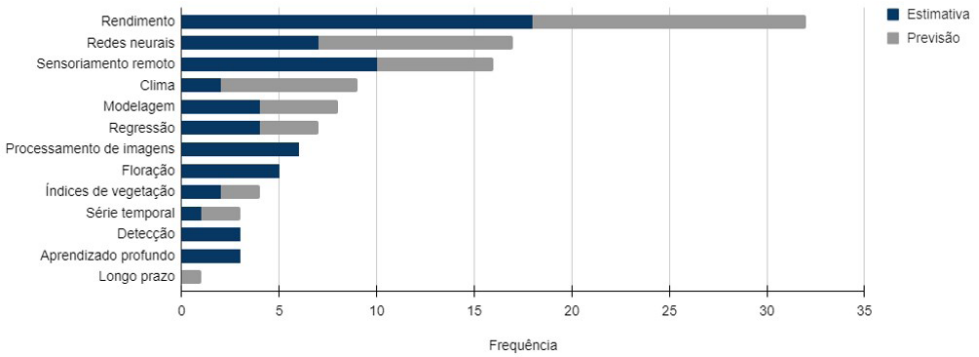


Figura 2. Frequência de ocorrência das palavras-chave nas publicações.

componentes de produção (Laurent et al., 2021). Por definição, variáveis diretas são variáveis diretamente associadas ao rendimento em qualquer estágio do desenvolvimento da cultura, sendo comumente utilizadas as variáveis relativas ao número de flores e frutos, o peso médio dos frutos e o diâmetro da seção transversal do tronco (He et al., 2022).

A aquisição de variáveis diretas por meio de processamento de imagens é uma alternativa rápida e não invasiva comparando-se à amostragem manual. As imagens possibilitam a identificação e a contabilização do número de flores ou de frutos e, em seguida, a utilização de modelos de aprendizado profundo, como redes neurais convolucionais (CNN) e suas derivações, para estimar o rendimento final (Chen et al., 2019; Tian et al., 2019). Outra possibilidade é a utilização de modelos capazes de reconhecer traços fenótipos das culturas, os quais são relacionados com a produção (Stajnko; Cmelik, 2005; Sarron et al., 2018).

Uma solução também explorada para estimar a produção é por meio de modelos lineares, considerando que pode ser estabelecida uma relação linear e conhecida, pelo menos parcialmente, entre os dados de entrada e de saída (Aggelopoulou et al., 2009). Além do método baseado em variável de entrada única, são utilizados métodos de regressão linear múltipla que incluem mais de um parâmetro de entrada como variável explicativa (Jimenez; Diaz, 2004; Salvo et al., 2012). Nesses casos, diferentes abordagens, como a contagem do número de flores (Dorj et al., 2017), o uso de imagens RGB para aquisição de dados (Črtomir et al., 2012) e a utilização de índices de vegetação (IVs) (Anastasiou et al., 2018), são alternativas.

De forma resumida e em razão do tipo de variável preferencialmente utilizada para estimar o rendimento, essa estratégia considera apenas a janela temporal anual da produção. Assim, os modelos têm como objetivo principal fornecer uma estimativa de rendimento no decorrer da safra (n) sobre a produção de frutos esperada para aquele respectivo ano. Entretanto, essa estratégia de avaliação pode se tornar mais complexa quando se deseja extrapolar os resultados de rendimento de um ano para o outro.

Mesmo com a relação entre o número de flores e o número de frutos previamente estabelecida, esta pode não ser útil em extrapolações para além do ano de coleta de dados, principalmente em regiões que apresentam intensa variabilidade de produção ano a ano, como é o caso de regiões ambientalmente limítrofes para uma determinada cultura. Nesse caso, a alternância de produção interanual e a variabilidade dos indicadores tornam difícil, senão impossível, produzir um modelo global que forneça resultados precisos para qualquer ano, quando calibrado com base em dados diretamente relacionados à produção de uma safra (Ballesteros et al., 2020). Ademais, considerando que o rendimento apresenta forte correlação com parâmetros de resposta temporal, pode não ser estratégico considerar apenas indicadores anuais para uma avaliação precisa do rendimento de árvores frutíferas perenes.

Em contrapartida, os modelos de previsão do rendimento (modelos preditivos) são desenvolvidos a partir de dados de safras anteriores (n-1) ou de períodos pré-desenvolvimento da safra atual (n) (Laurent et al., 2021). A previsão envolve, na maioria dos casos, a caracterização de fatores relacionados ao clima, à fisiologia das plantas e à gestão dos pomares. Para isso, normalmente são utilizadas variáveis indiretas, ou seja, variáveis que não são diretamente associadas ao rendimento, mas que influenciam ou interagem com os componentes do rendimento em algum nível, com o objetivo de estabelecer relações quantitativas de causa-efeito entre indicadores fisiológicos e climatológicos, e o rendimento das culturas.

As variáveis indiretas identificadas na literatura como as utilizadas com maior frequência para a previsão do rendimento foram as climáticas (temperatura do ar, precipitação, fotoperíodo, intensidade de radiação solar) (Molitor; Keller, 2017), as fisiológicas

(idade do pomar, densidade de plantio, espaçamento entre árvores) (Jin et al., 2020) e os índices de vegetação (IVs) (Ye et al., 2005; Birkhoff; Robson, 2021). Alguns estudos incluíram indicadores de localização geográfica (latitude, longitude) (Brinkhoff; Robson, 2021; Jin et al., 2020) e de propriedades físicas e químicas do solo (condutividade elétrica, conteúdo de matéria orgânica) (Papageorgiou et al., 2013). Com isso, foi possível identificar potenciais opções de ação no âmbito da modelagem para a previsão na fruticultura de precisão, sendo que indicadores climatofisiológicos tendem a ser mais representativos que indicadores relacionados às propriedades do solo.

Com relação à classe de modelo utilizada para a previsão do rendimento, modelos lineares e modelos de aprendizado de máquina, como as florestas randômicas (*Randon Forest Model*), apareceram com destaque (Ye et al., 2005; Sirsat et al., 2019; Bai et al., 2021), os quais podem ser classificados como modelos estocásticos. Uma alternativa é a modelagem mecanística, a qual pode ser útil com a finalidade de previsão do rendimento da cultura perene devido à sua capacidade de hierarquizar fatores relevantes no desenvolvimento dos frutos e quantificar seus efeitos para a produção final (Maselli et al., 2012; Guilpart et al., 2014).

Na modelagem de previsão, os fatores temporais são incluídos, pelo menos parcialmente, pois os modelos preditivos consideram que as condições da cultura serão alteradas entre a coleta de dados, a modelagem e o relatório de avaliação de rendimento em função do horizonte de previsão. No entanto, uma quantidade mínima de estudos se interessou por realizar uma previsão de rendimento de longo prazo, isto é, quando a previsão da safra *n* é realizada sem depender de nenhuma variável proveniente do ano *n* (Beattie; Folley, 1978; Sakai; Noguchi; Asada, 2008; Brinhoff; Robson, 2021).

A utilização de dados da safra atual (n), mesmo que relativos a variáveis indiretas, pode limitar o alcance da previsão, pois reduz a janela temporal disponível para ações de manejo da cultura e de tomada de decisão a fim de aumentar a produtividade, visto que a produção do ano (n) já está estabelecida. Logo, o conjunto ideal de dados para obter uma previsão de rendimento de longo prazo contém, basicamente, variáveis agregadas de anos anteriores (*n*-1, *n*-2, *n*-3,...).

3 CONSIDERAÇÕES ACERCA DA ESCALA TEMPORAL PARA O DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE PREVISÃO DE RENDIMENTO

Os efeitos de trajetória no escopo da previsão de rendimento de frutíferas perenes, como implicações de influências acumuladas ao longo do período de vida útil da planta, são aspectos complexos de investigação, mas foram sugeridos por estudos que avaliaram o comportamento do rendimento ao longo de múltiplos anos (Sakai et al., 2008; Lordan et al., 2018). Assim, as informações contidas em séries temporais longas de dados podem ser explicativas do desenvolvimento do rendimento da cultura por registrarem os efeitos da sua trajetória.

No entanto, poucas foram as tentativas de representar a variabilidade temporal do sistema de produção perene por meio de um inventário abrangente de gestão de safras ao longo de múltiplos anos. Os resultados da análise do banco de dados temporal utilizado para condução das pesquisas de previsão de rendimento, considerando a amostra de 19 trabalhos nessa categoria, indicaram que a modelagem foi realizada com base em registros históricos de mais de 10 anos em 11% dos casos, enquanto a maioria dos trabalhos (47%) utilizou dados de no máximo três safras anteriores (Figura 3), o que pode significar um período insuficiente para avaliação da variabilidade temporal da produção de variedades perenes e, consequentemente, dos efeitos que influências passadas têm na produção atual (Sakai et al., 2008).

Além disso, poucos estudos abordaram a importância da temporalidade em suas avaliações, o que pode ser realizado por meio de variáveis intrassazonais. Variáveis climáticas e IVs são capazes de fornecer dados cronológicos do desenvolvimento da cultura. Entretanto, a maioria dos trabalhos disponíveis na literatura tem focado em indicadores pontuais, os quais se fundamentam em alguns estádios fenológicos ou em algumas etapas temporais específicas, como, por exemplo, a temperatura média do ar em torno do período de floração (Keller; Molitor, 2017), o que muitas vezes é considerado independente quando analisado com métodos clássicos, como a regressão linear (Guilpart et al., 2014).

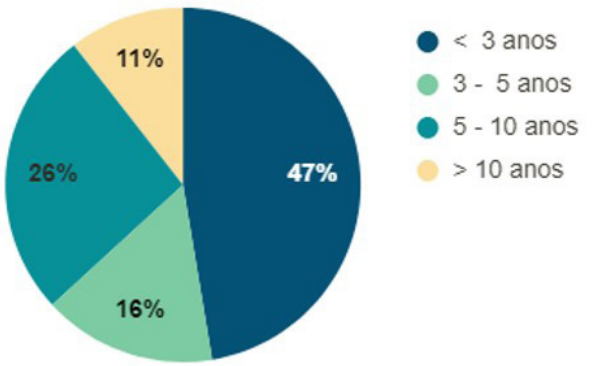


Figura 3. Distribuição percentual do período temporal de dados utilizado para previsão do rendimento.

Visto que a produtividade de culturas perenes pode apresentar alta variabilidade ano a ano, nota-se que a definição de métodos precisos para avaliação ou redução da alternância de produção ainda não ocorreu. Portanto, essa tarefa exige a coleta de dados de alta qualidade acerca do rendimento dos pomares ao longo uma série temporal extensa para que seja possível estabelecer relações causais entre o rendimento e os fatores ambientais ou de gestão das áreas plantadas (Logan et al., 2016; Brinkhoff; Robson, 2021). Assim, podem-se desenvolver modelos de previsão capazes de identificar e relacionar padrões temporais e espaciais de rendimento em áreas produtivas.

O uso de novos ou mais avançados métodos de avaliação que incluam análise de séries temporais pode auxiliar na obtenção de melhores informações e contribuir para o desenvolvimento de modelos de previsão mais robustos e com maior vantagem operacional, capazes de fornecer respostas precisas com tempo de antecedência suficiente para permitir ajustes de manejo antes do estabelecimento da produção e, consequentemente, da colheita. Ainda, o desenvolvimento de um banco de dados consistente a respeito do histórico de produção e do manejo de pomares é um aspecto crítico para estudos futuros. Assim, a abordagem temporal para previsão do rendimento pode ser consistente, favorecendo a tomada de decisão para a definição de zonas de manejo e o aumento da produtividade.

REFERÊNCIAS

AGGELOPOULOU, K. D.; WULFSOHN, D.; FOUNTAS, S.; GEMTOS, T. A.; NANOS, G. D.; BLACKMORE. Spatial variation in yield and quality in a small apple orchard. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 5, p. 538-556, 2009.

ANASTASIOU, E.; BALAFOUTIS, A.; DARRA, N.; PSIROUKIS, V.; BINIARI, A.; XANTHOPOULOS, G.; FOUNTAS, S. Satellite and proximal sensing to estimate the yield and quality of table grapes. **Agriculture**, v. 8, n. 7, p. 94, 2018.

BAI, X.; LI, Z.; LI, W.; ZHAO, Y.; LI, M.; CHEN, H.; WEI, S.; JIANG, Y.; YANG, G.; ZHU, X. Comparison of machine-learning and CASA models for predicting apple fruit yields from time-series planet imageries. **Remote Sensing**, v. 13, n. 16, p. 3073, 2021.

BALLESTEROS, R.; INTRIGLIOLO, D. S.; ORTEGA, J. F.; RAMÍREZ-CUESTA, J. M.; BUESA, I.; MORENO, M. A. Vineyard yield estimation by combining remote sensing, computer vision and artificial neural network techniques. **Precision Agriculture**, v. 21, n. 6, p. 1242-1262, 2020.

BEATTIE, B. B.; FOLLEY, R. R. W. Production variability in apple crops. II. The long-term behaviour of the English crop. **Scientia Horticulturae**, v. 8, n. 4, p. 325-332, 1978.

BRINKHOFF, J., ROBSON, A.J. Block-level macadamia yield forecasting using spatio-temporal datasets. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 303, pp. 108369, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108369.

CHEN, Y.; LEE, W.S.; GAN, H.; PERES, N.; FRAISSE, C.; ZHANG, Y.; HE, Y. Strawberry yield prediction based on a deep neural network using high-resolution aerial orthoimages. **Remote Sensing**, v. 11, n. 13, p. 1584, 2019.

ČRTOMIR, R.; URŠKA, C.; STANISLAV, T.; DENIS, S.; KARMEN, P.; PAVLOVIČ, M.; MARJAN, V. Application of neural networks and image visualization for early forecast of apple yield. **Erwerbs-Obstbau**, v. 54, n. 2, p. 69-76, 2012.

DAMBREVILLE, A.; LAURI, P-E.; TROTTIER, C.; GUÉDON, Y.; NORMAND, F. Deciphering structural and temporal interplays during the architectural development of mango trees. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 8, p. 2467-80, 2013. DOI: https://doi.org/10.1093/jxb/ert105.

DORJ, U.-O.; LEE, M.; YUN, S. An yield estimation in citrus orchards via fruit detection and counting using image processing. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 140, p. 103-112, 2017.

FISHER, D. Understanding technology adoption through system dynamics modeling: Implications for agribusiness management. **The International Food and Agribusiness Management Review**, v. 3, n. 3, p. 281-296, 2000.

GUILPART, N.; METAY, A.; GARY, C. Grapevine bud fertility and number of berries per bunch are determined by water and nitrogen stress around flowering in the previous year. **European Journal of Agronomy**, v. 54, p. 9-20, 2014.

HE, L.; FANG, W.; ZHAO, G.; WU, Z.; FU, L.; LI, R.; MAJEED, Y.; DHUPIA, J. Fruit yield prediction and estimation in orchards: A state-of-the-art comprehensive review for both direct and indirect methods. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 195, p. 106812, 2022.

JIMÉNEZ, C. M.; DÍAZ, J. B. R. Statistical model estimates potential yields in ` Golden Delicious' and ` Royal Gala' apples before bloom. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 129, n. 1, p. 20-25, 2004.

JIN, Y.; CHEN, B.; LAMPINEN, B. D.; BROWN, P. H. Advancing agricultural production with machine learning analytics: yield determinants for California's almond orchards. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020.

KELLER, M.; MOLITOR, D. Yield of Müller-Thurgau and Riesling grapevines is altered by meteorological conditions in the current and previous growing seasons. **OENO One**, v. 50, n. 4, 2017.

LAURENT, C.; OGER, B.; TAYLOR, J. A.; SCHOLASCH, T.; METAY, A.; TISSEYRE, B. A review of the issues, methods and perspectives for yield estimation, prediction and forecasting in viticulture. **European Journal of Agronomy**, v. 130, p. 126339, 2021.

LOGAN, T. M.; MCLEOD, S.; GUIKEMA, S. Predictive models in horticulture: a case study with Royal Gala apples. **Scientia Horticulturae**, v. 209, p. 201-213, 2016.

LORDAN, J.; FRANCESCATTO, P.; DOMINGUEZ, L. I.; ROBINSON, T. L. Long-term effects of tree density and tree shape on apple orchard performance, a 20 year study—Part 1, agronomic analysis. **Scientia Horticulturae**, v. 238, p. 303-317, 2018.

MASELLI, F.; CHIESI, M.; BRILLI, L.; MORIONDO, M. Simulation of olive fruit yield in Tuscany through the integration of remote sensing and ground data. **Ecological Modelling**, v. 244, p. 1-12, 2012.

MOLITOR, D., KELLER, M. Yield of Müller–Thurgau and Riesling grapevines is altered by meteorological conditions in the current and previous growing seasons. **OENO One**, v. 51, n. 2, 2017. DOI: https://doi.org/10.20870/oeno-one.2017.51.2.1647.

PAPAGEORGIOU, E. I.; AGGELOPOULOU, K. D.; GEMTOS, T. A.; NANOS, G. D. Yield prediction in apples using Fuzzy Cognitive Map learning approach. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 91, p. 19-29, 2013.

SAKAI, K.; NOGUCHI, Y.; ASADA, S. Detecting chaos in a citrus orchard: reconstruction of nonlinear dynamics from very short ecological time series. **Chaos, Solitons & Fractals**, v. 38, n. 5, p. 1274-1282, 2008.

SALVO, S.; MUÑOZ, C.; ÁVILA, J.; BUSTOS, J.; RAMÍREZ-VALDIVIA, M.; SILVA, C.; VIVALLO, G. An estimate of potential blueberry yield using regression models that relate the number of fruits to the number of flower buds and to climatic variables. **Scientia Horticulturae**, v. 133, p. 56-63, 2012.

SARRON, J.; MALÉZIEUX, E.; SANÉ, C. A. B.; FAYE, E. Mango yield mapping at the orchard scale based on tree structure and land cover assessed by UAV. **Remote Sensing**, v. 10, n. 12, pp. 1900, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/rs10121900.

SIRSAT, M. S.; MENDES-MOREIRA, J.; FERREIRA, C.; CUNHA, M. Machine Learning predictive model of grapevine yield based on agroclimatic patterns. **Engineering in Agriculture, Environment and Food**, v. 12, n. 4, p. 443-450, 2019.

STAJNKO, D.; CMELIK, Z. Modelling of apple fruit growth by application of image analysis. **Agriculturae Conspectus Scientificus**, v. 70, n. 2, 2005.

TIAN, Y.; YANG, G.; WANG, Z.; WANG, H.; LI, E.; LIANG, Z. Apple detection during different growth stages in orchards using the improved YOLO-V3 model. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 157, p. 417-426, 2019.

YE, X.; SAKAI, K.; SASAO, A.; ASADA, S. Airborne hyperspectral imaging for investigating the dynamics of alternate bearing in citrus. **Agricultural Information Research**, v. 14, n. 4, p. 261-272, 2005.

60

Zonas homogêneas de atributos de solo e de planta na produção de uvas colhidas no inverno

Homogeneous zones of soil and plant attributes in the production of grapes from winter harvest.

Luís Henrique Bassoi[1], Henrique Oldoni[2], Bruno Ricardo Silva Costa[3], Thassio Monteiro Menezes da Silva[4], Larissa Godarelli Farinassi[5], Anderson de Jesus Pereira[6]

[1] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, luis.bassoi@embrapa.br*
[2] *Pós-graduando, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA), Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia, Botucatu (SP), Brasil, henriqueoldoni@gmail.com,*
[3] *Pós-graduando, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA), Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia, Botucatu (SP), Brasil, bruno.ricardo.silva@hotmail.com*
[4] *Pós-graduando, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA), Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia, Botucatu (SP), Brasil, thassio_monteiro@hotmail.com*
[5] *Pós-graduando, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA), Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia, Botucatu (SP), Brasil, larissa_godarelli@hotmail.com*
[6] *Pós-graduando, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA), Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia, Botucatu (SP), Brasil, agroandersonn@gmail.com*

RESUMO

A delimitação de zonas homogêneas de atributos de solo e de planta para a caracterização da variabilidade espacial em vinhedos é apresentada neste capítulo. São apresentados alguns procedimentos para a medida desses atributos e obtenção das zonas homogêneas, com o enfoque em vinhedos para colheita de uva no inverno do Sudeste do Brasil para vinificação.

Palavras-chave: variabilidade espacial; condutividade elétrica aparente do solo; vigor vegetativo; índice de vegetação; viticultura de precisão.

ABSTRACT

This chapter discusses the delimitation of homogeneous zones of soil and plant attributes for characterizing vineyard spatial variability. It presents some procedures for measuring attributes and obtaining homogeneous zones, with a focus on vineyards for winter grape harvesting in Southeast Brazil for winemaking.

Keywords: spatial variability; apparent soil electrical conductivity; vegetative vigor; vegetation index; precision viticulture.

1 INTRODUÇÃO

A variabilidade espacial de fatores físicos, químicos e biológicos de um vinhedo pode causar uma variação espacial na qualidade e rendimento da uva dentro da mesma área, e as decisões de manejo do vinhedo podem considerar tal situação para a obtenção de um produto de maior qualidade e valor. No entanto, essas decisões dependem da disponibilidade de dados precisos e confiáveis que caracterizem a variabilidade espacial em descritores de videira relevantes (Hall et al., 2002).

O desenvolvimento e a aplicação de sistemas de sensoriamento para obtenção de dados relativos à biomassa, índice de área foliar, rendimento e qualidade da uva podem fornecer informações com uma resolução nunca antes alcançada na viticultura, bem como desenvolver métodos para quantificar a variabilidade em um vinhedo e ferramentas de processamento de dados para auxiliar os viticultores a

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000033

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

manipular, analisar e tomar decisões a partir dessas informações. Todavia, existem desafios. Como tomar decisões sensatas a partir dos dados obtidos por meio dessas tecnologias e metodologias? Para isso, é necessária uma maior compreensão se tais dados se relacionam com a fisiologia da videira. Outro desafio é o da capacitação para fornecer as habilidades, treinamento e orientação para que se tenha o uso da viticultura de precisão (VP) em larga escala (Tisseyre et al., 2007).

A prática da VP justifica-se por várias razões: as videiras crescem em linhas e com uma distância fixa entre plantas, e os pontos de amostragem podem ser aplicados às videiras individuais e georreferenciadas; as coletas de dados realizadas ano após ano podem originar séries históricas importantes para a gestão do vinhedo; a sua natureza perene sugere que a variação espacial do rendimento manterá algum padrão de comportamento de um ano para o outro, uma característica essencial caso se deseje realizar um manejo diferenciado ou sítio-específico no vinhedo e houver interesse por informações sobre a qualidade da uva entre as zonas de um vinhedo (Arnó et al., 2009).

Quatro etapas podem sucintamente exemplificar o emprego da VP. A primeira é a observação das características de um vinhedo, onde diversas fontes de dados são obtidas, tendo em comum uma localização geográfica à qual a informação está vinculada. A segunda etapa é a interpretação, que implica criar saídas utilizáveis (mapas de superfície) a partir das fontes de dados obtidas na etapa anterior, baseada em interpolação de dados georreferenciados e sensoriamento remoto. A avaliação da interpretação é a terceira etapa, onde há a análise dos mapas e a criação de zonas de manejo ou zonas de tratamento diferenciado no vinhedo para examinar a variabilidade que existe na área. A quarta e última etapa explora a variabilidade dentro do vinhedo, por meio do manejo diferenciado, e ano após ano a coleta, a interpretação e a avaliação dos dados possibilitam ajustes neste manejo (Mathews, 2013).

Assim, este texto apresenta uma discussão sobre conceitos e práticas para a determinação de zonas homogêneas de atributos do solo e da planta, para a adoção da AP em vinhedos destinados à produção de vinhos, ou, especificamente, vitivinicultura de precisão. O enfoque é o sistema de produção de uvas para vinhos de inverno, com base na adoção do sistema de "dupla poda" da videira no Sudeste do Brasil (Galaz et al., 2020).

2 ZONAS HOMOGÊNEAS DE ATRIBUTOS DO SOLO E DA PLANTA

A zona homogênea de um atributo pode ser entendida como uma subárea onde uma medida não difere de outra medida nessa mesma subárea, ou seja, ambas podem representar o comportamento desse atributo, mas difere da medida em outra zona homogênea na mesma área, caracterizando assim a sua variabilidade.

A variabilidade espacial dos vinhedos tem sido avaliada por meio de atributos do solo (parâmetros físicos e químicos, CEa), da planta (reflectância do dossel, vigor, qualidade e produtividade da uva), altitude e declividade (Tardaguila et al., 2011; Rossi et al., 2013; Urretavizcaya et al., 2017). Esses atributos têm suas particularidades com base no método utilizado, no tempo e no custo envolvido na aquisição dos dados. Quanto maior o número de atributos considerados, melhor poderá ser a caracterização da variabilidade espacial de um vinhedo ou entre vinhedos.

A variabilidade espacial das frações granulométricas (areia, silte e argila) do solo de um vinhedo pode definir as zonas homogêneas, as quais podem orientar o local de instalação de sensores para a medida da umidade do solo (Figura 1). Em Espírito Santo do Pinhal (SP), em um vinhedo "Chardonnay" irrigado por gotejamento e com sistema de sustentação de plantas em espaldeira, as zonas identificadas segundo esse critério apresentaram diferenças significativas entre os valores médios de água disponível no solo e de água prontamente disponível no solo. Isto demostra que a utilização limitada de atributos físicos do solo na delimitação de zonas homogêneas pode ser uma alternativa na redução de custos iniciais na adoção da VP sem comprometer a confiabilidade dos resultados (Oldoni et al., 2018a).

A determinação da CEa tem sido utilizada para caracterizar a variabilidade espacial do solo, pois este atributo se correlaciona com diversas propriedades físicas e químicas do solo cujas aquisições são mais trabalhosas e demoradas (Corwin; Lesch, 2005; Molin; Castro, 2008). Portanto, a CEa pode descrever a variabilidade do solo em vinhedos (Bramley et al., 2011) e, consequentemente, parâmetros como vigor vegetativo da videira, produção e composição da uva, que dependem diretamente da variabilidade de vários atributos do solo (Tardaguila et al., 2011).

No mesmo vinhedo "Chardonnay" da Figura 1, Oldoni (2019) avaliou o uso da CEa na determinação de zonas para o monitoramento da umidade do solo (θ, $m^3\ m^{-3}$). Para isso, utilizou um medidor portátil (Rabello et al., 2011) para medida de CEa (Figura 2, esquerda). A textura do solo foi classificada como argilosa. O uso apenas de CEa deve ser limitado quan-

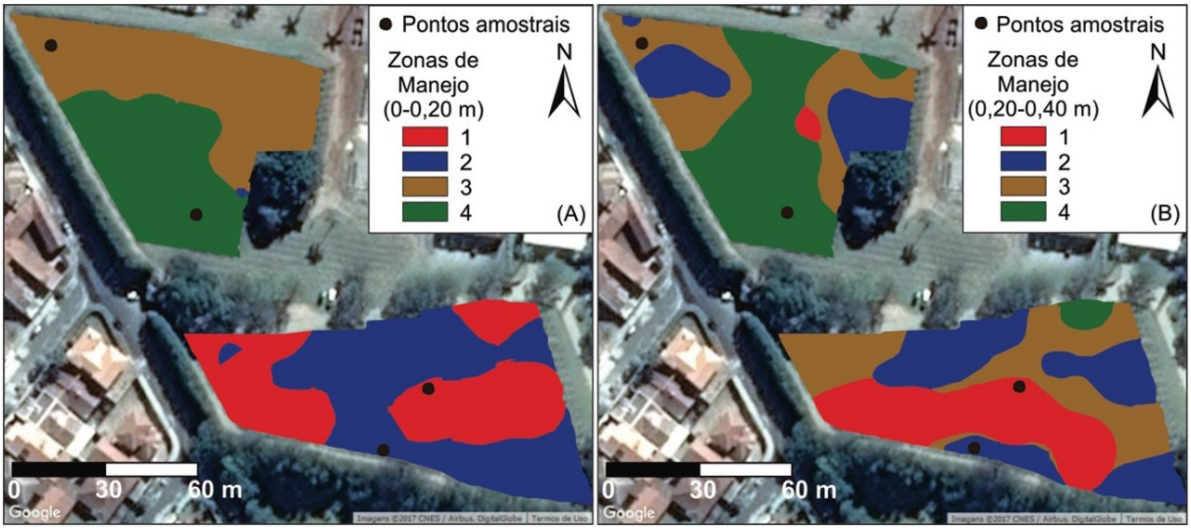


Figura 1. Zonas homogêneas de frações granulométricas do solo nas camadas de 0-0,20 m (A) e 0,20-0,40 m (B), com pontos de instalação de sensores de umidade do solo. (Fonte: Oldoni et al., 2018a).

Figura 2. Medidor portátil de condutividade elétrica aparente do solo – CEa (esquerda) e localização das medidas de CEa e da umidade do solo (θ) nas áreas 1 e 2 do vinhedo (direita) (Fonte: Oldoni, 2019).

do apresentar alta correlação com o conteúdo de água disponível no solo (AD). A inclusão da granulometria do solo (areia, silte e argila) auxiliou na determinação dessas zonas, e a sua contribuição foi maior quando a CEa não apresentou alta correlação com AD. A inclusão de valores de θ na camada de solo de 0-0,2 m, medidos por um TDR quando da realização da medida de CEa (Figura 2, direita), pouco contribuiu para a delimitação das zonas para o monitoramento da umidade do solo.

Ainda em relação ao vinhedo "Chardonnay", as medidas georreferenciadas de CEa na camada superior de solo de 0,4 m deram origem a mapas com duas e três zonas homogêneas desse atributo do solo (Figura 3), e por meio de análise de variância e de comparação entre médias, verificou-se a diferença significativa dos atributos da planta (número de cachos por planta, peso total do cacho por planta, massa média do cacho e massa fresca dos ramos podados) entre zonas de CEa. O rendimento e a massa dos cachos e dos ramos aumentaram com o aumento de CEa quando três e duas zonas homogêneas de CEa foram consideradas, indicando que elas podem ser usadas como orientação para avaliar a variabilidade da produção e das plantas no vinhedo (Oldoni et al., 2019a).

Um questionamento que ocorre é o relacionado à configuração amostral de medidas de CEa em um vinhedo com medidor portátil manual, pois a sua determinação consome tempo e mão de obra consideráveis. A redução do número de pontos amostrais permite

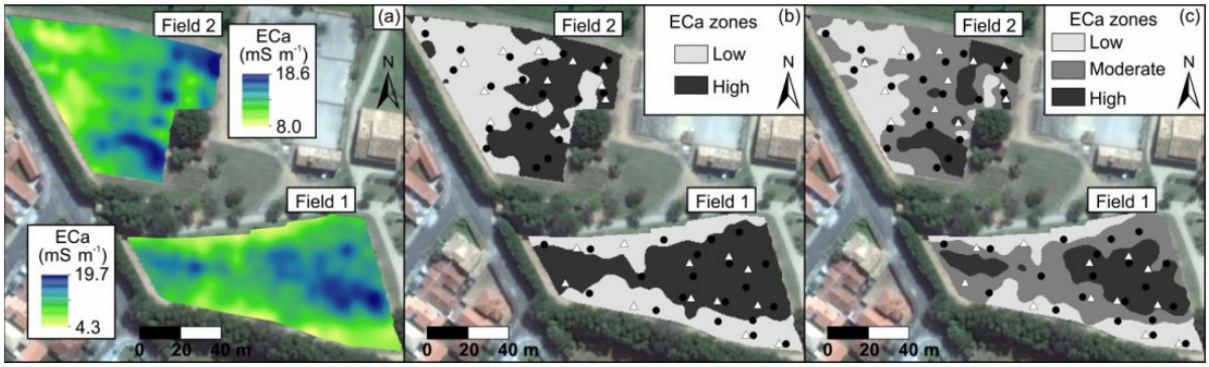


Figura 3. Mapas de distribuição espacial da condutividade elétrica aparente do solo (CEa, mS m^{-1}) na camada superior de 0,4 m (a) e mapas com duas (b) e três (c) zonas homogêneas de CEa delimitadas nos campos 1 e 2 no vinhedo "Chardonnay". Os círculos pretos e os triângulos brancos indicam as plantas onde foram medidos os dados de produção e o vigor vegetativo, respectivamente (Fonte: Oldoni et al., 2019a).

minimizá-los, mas pode resultar em aumento da incerteza dos mapas interpolados. Em três vinhedos cultivados com "Cabernet Franc" (1,5 ha), "Cabernet Sauvignon" (0,9 ha) e "Chardonnay" (0,6 ha), irrigados por gotejamento em Espírito Santo do Pinhal (SP), Oldoni et al. (2019b) avaliaram o melhor espaçamento e número de medidas de CEa obtidas pelo medidor portátil (Figura 2), para que a qualidade dos mapas gerados em três vinhedos fosse preservada (Figura 4). Um limite mínimo de 100 pontos amostrais deve ser considerado para o planejamento amostral para geração de mapas de distribuição espacial da CEa, com uma abordagem mais conservadora quanto ao aumento do espaçamento na direção do declive do terreno.

Medidas de CEa nas camadas de 0-0,20 m, 0-0,40 m, 0-0,50 m e 0-1,00 m foram feitas em dois vinhedos localizados em Ribeirão Preto (SP) e Itobi (SP), utilizando um medidor portátil (Rabello et al., 2011) e o sensor EM38-MK2. A CEa apresenta variabilidade espacial ao longo do perfil do solo, porém o padrão de distribuição de zonas homogêneas desse atributo nos vinhedos é variável conforme o intervalo de profundidade e a área avaliada. A maior concordância entre os mapas categóricos de CEa correspondentes às camadas de 0-0,20 m e 0-0,40 m (Figura 5) indicam que essas camadas podem apresentar semelhança quanto aos seus atributos físico-químicos (Costa et al., 2022).

Os índices de vegetação (IV) são medidas quantitativas usadas para descrever a distribuição e variabilidade espacial da cobertura vegetal de áreas naturais ou cultivadas. Uma das dificuldades encontradas no emprego da AP é a grande quantidade de amostras e coletas de dados no campo, que acaba dificultando a agilidade da operação, desmotivando a adoção desta. Tendo em vista essa limitação, trabalhos são realizados de forma a minimizar esse problema e aumentar a operacionalidade das práticas de AP e a sua adoção. No entanto, deve-se ressaltar que diferentes procedimentos no sensoriamento podem interferir na estimativa de IV.

Em Espírito Santo do Pinhal (SP), em dois vinhedos ("Cabernet Franc" – 1,5 ha, e "Cabernet Sauvignon" – 0,6 ha, com sustentação de plantas em espaldeira e condução dos ramos em cordão Royat unilateral), a redução da densidade amostral do NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index* (Figura 6), por diferentes combinações de caminhamentos para o sensoriamento proximal com o sensor ativo Crop Circle ACS-430, interferiu na qualidade dos mapas gerados (Oldoni et al., 2018b).

Para ambos os vinhedos, a redução de até 33% do número de fileiras amostradas garantiu uma moderada concordância dos mapas em relação aos mapas gerados utilizando todas as fileiras de plantas (Figuras 7 e 8). Dependendo do detalhamento necessário do mapa, menores densidades amostrais podem ser consideradas. Diferentes combinações de caminhamentos para as leituras de NDVI, ainda que mantendo a mesma densidade amostral, promovem alterações significativas na distribuição espacial dos dados (Oldoni et al., 2018b).

O monitoramento de IVs pode sofrer influência do desponte dos ramos de videira de vinho. Em Espirito Santo do Pinhal (SP), mapas de NDVI foram gerados a partir de duas coletas de dados de reflectância das folhas, com o sensor óptico ativo Crop Circle ACS-430 posicionado no topo do dossel. As medidas foram realizadas em um intervalo de 15 dias, sendo uma antes e outra depois do desponte dos ramos de três cultivares de videira de vinho ("Cabernet Franc" – vinhedo 1; "Cabernet Sauvignon" – vinhedo 2; e "Chardonnay" – vinhedo 3), sustentadas por espaldeira. A prática do desponte alterou consideravelmente a distribuição do conjunto de dados de NDVI, com aumento da média

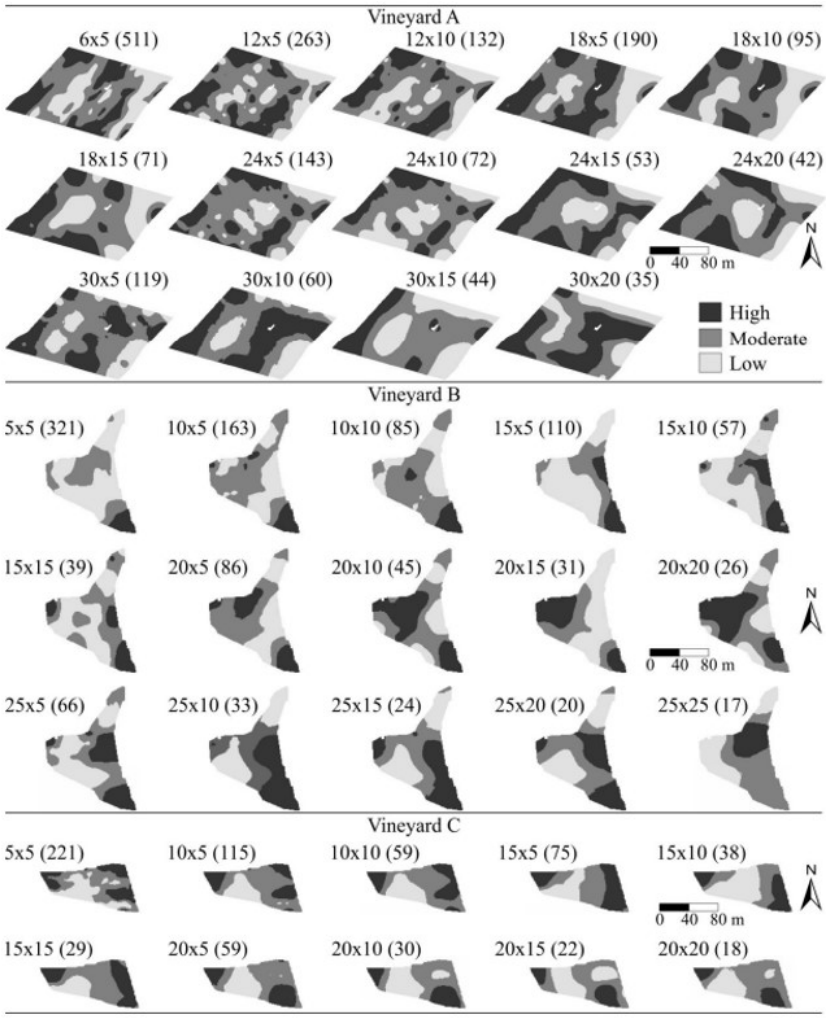


Figura 4. Distribuição espacial da CEa em três categorias de valores provenientes de medições de diferentes grades amostrais e com diferentes números de pontos (entre parênteses), nos vinhedos "Cabernet Franc" (A), "Cabernet Sauvignon" (B) e "Chardonnay" (C) (Oldoni et al., 2019b).

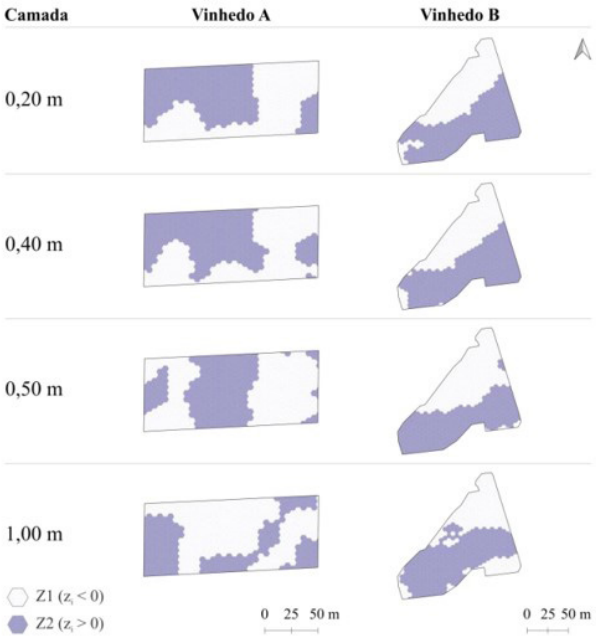


Figura 5. Mapas categóricos de valores interpolados normalizados da CEa do solo medida em diferentes camadas de solo em um vinhedo em Ribeirão Preto – vinhedo A e em Itobi – vinhedo B (Costa et al., 2022).

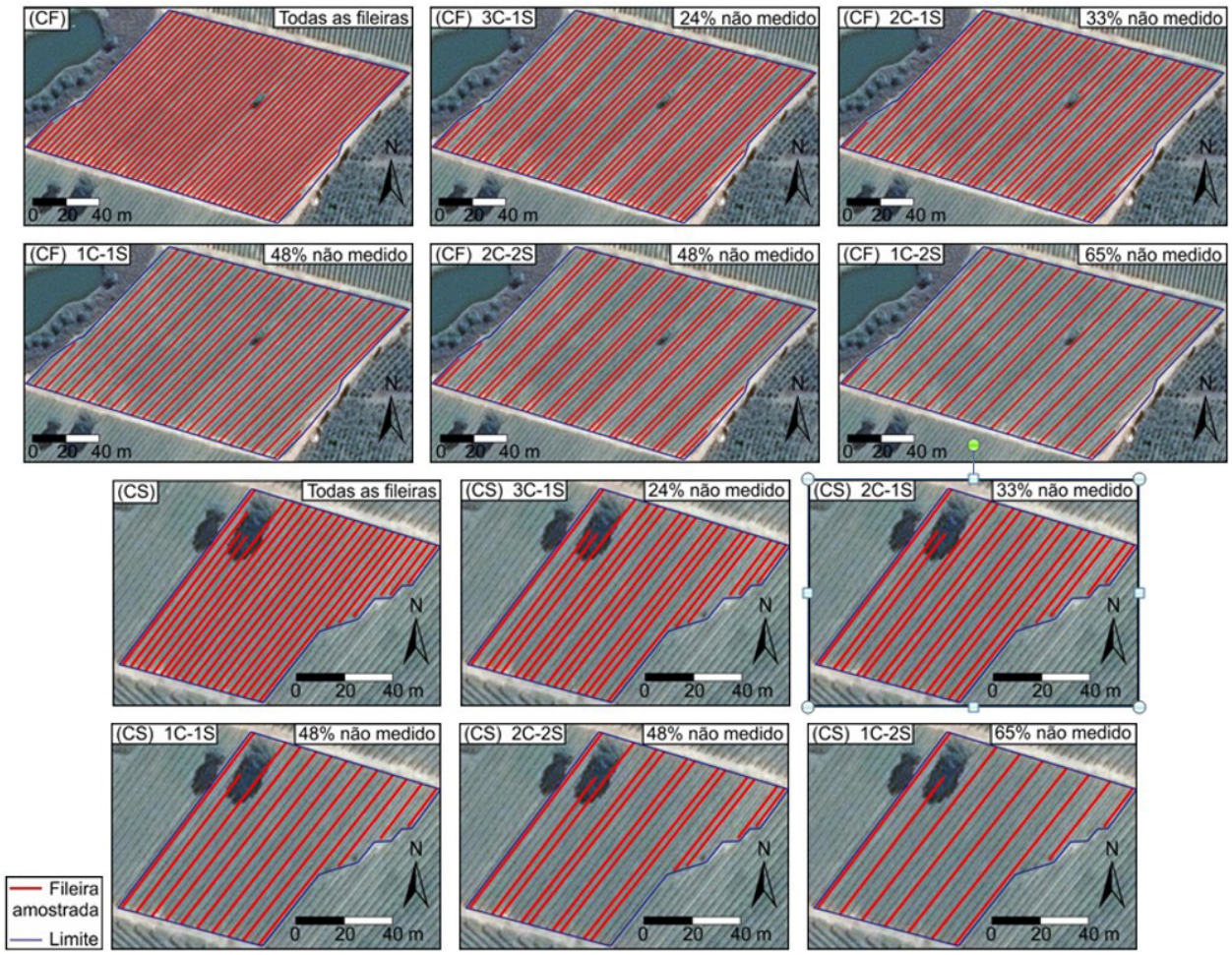


Figura 6. Representação das combinações de caminhamentos com diferentes porcentagens de fileiras não medidas, realizados nos pomares do cv. "Cabernet Franc" (CF) e "Cabernet Sauvignon" (CS), para as leituras do NDVI. Todas as fileiras: caminhamento em todas as fileiras de plantas; 3C-1S: caminhamento intercalado em três fileiras com e uma sem caminhamento; 2C-1S: duas fileiras com e uma sem caminhamento; 1C-1S: uma fileira com e uma sem caminhamento; 2C-2S: duas fileiras com e duas sem caminhamento; 1C-2S: uma fileira com e duas sem caminhamento (Oldoni et al., 2018b).

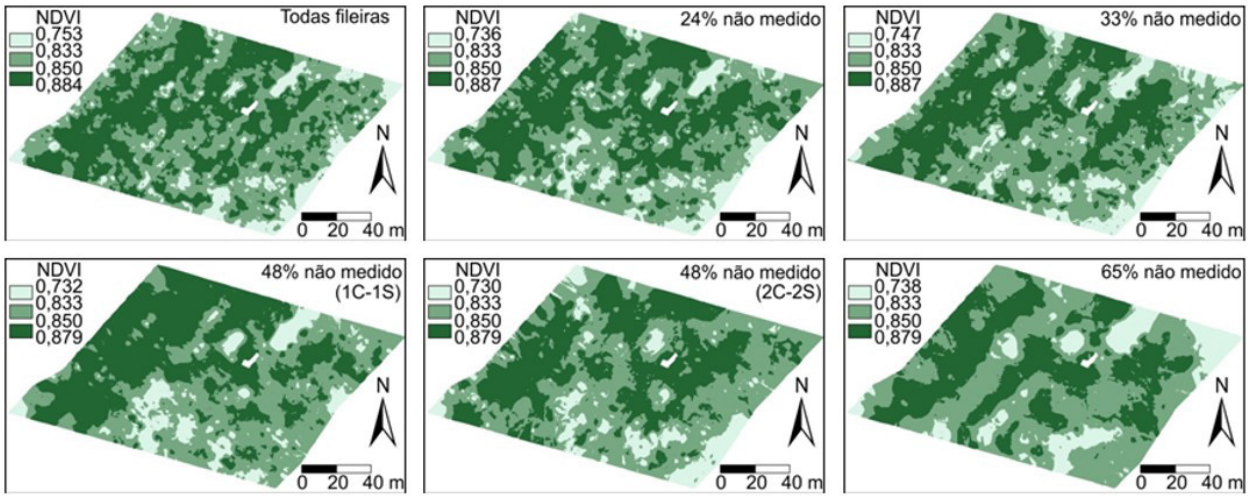


Figura 7. Mapas de distribuição espacial do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), para as diferentes combinações de caminhamentos nas fileiras de plantas de videira cv. "Cabernet Franc". 1C-1S, medidas intercaladas com uma fileira de planta sim e outra não; 2C-2S, medidas intercaladas com duas fileiras de plantas sim e duas não (Oldoni et al., 2018b).

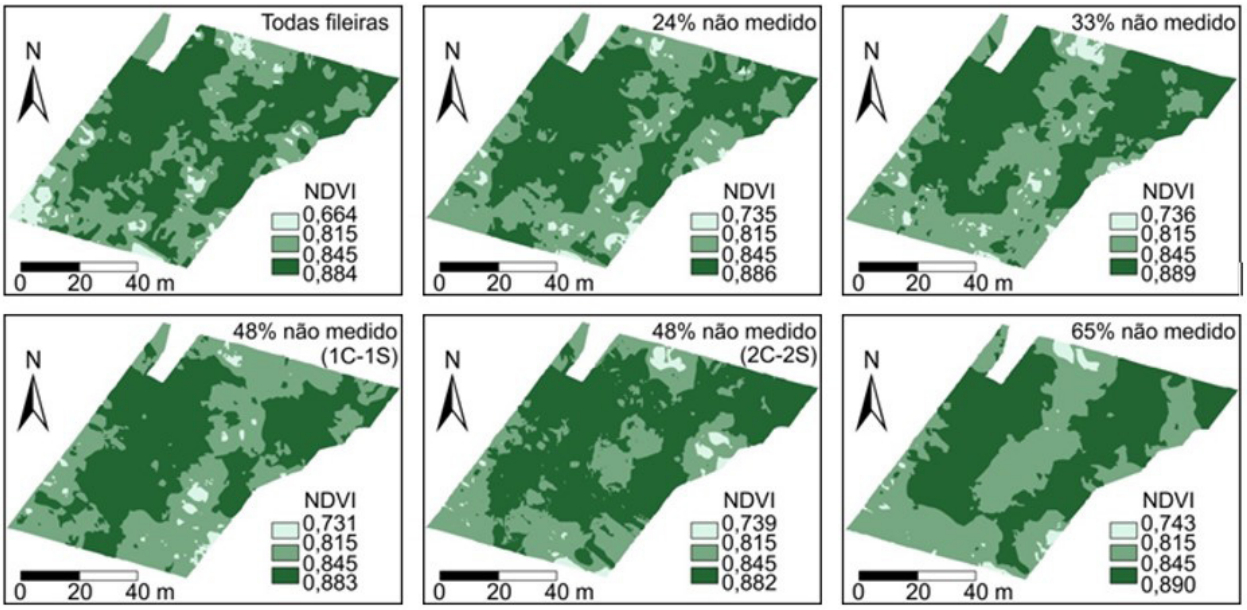


Figura 8. Mapas de distribuição espacial do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), para as diferentes combinações de caminhamentos nas fileiras de plantas de videira cv. "Cabernet Sauvignon". 1C-1S, medidas intercaladas com uma fileira de planta sim e outra não; 2C-2S, medidas intercaladas com duas fileiras de plantas sim e duas não (Oldoni et al., 2018b).

e diminuição da amplitude dos valores em todos os pomares avaliados (Figura 9). O desponte também alterou a distribuição espacial dos mapas de NDVI, principalmente nos pomares 1 e 2, onde os cultivares apresentavam maior volume de dossel em comparação ao pomar 3. A eliminação das folhas jovens nas pontas dos ramos pode justificar os resultados encontrados. Avaliações temporais de NDVI em pomares de videira devem ser realizadas com cautela, levando-se em conta a prática do desponte durante o ciclo de produção. Leituras realizadas após o desponte podem garantir uma melhor representatividade do dossel (Oldoni et al., 2018c).

A identificação de padrões de vegetação em vinhedos "Cabernet Franc" e "Cabernet Sauvignon" foi realizada por Costa et al. (2019a), em Espírito Santo do Pinhal (SP), Brasil. A refletância (ρ) foi medida em três comprimentos de onda do espectro eletromagnético (670 nm, 730 nm e 780 nm) na altura do dossel em pontos georreferenciados ao longo das linhas de videiras usando o sensor ativo Crop Circle ACS-430. Nove IVs foram calculados com base nas razões entre os valores de ρ (Figura 10). Apesar das variações nos padrões de distribuição espacial dos IVs, a análise multivariada resultou na categorização representativa do vigor vegetativo das videiras e na delimitação de zonas homogêneas para esta característica. Isso foi validado de acordo com as diferenças significativas observadas entre os IVs.

Em Ribeirão Preto (SP), foi observada uma discrepância no mapeamento do NDRE – *Normalized Difference Red Edge* – e NDVI estimados em um vinhedo "Syrah", irrigado por gotejamento e com sustentação de plantas em espaldeira, a partir de duas posições distintas do sensor ativo ACS-430 (sensoriamento proximal) para a medida da ρ das folhas: posicionamento do sensor no topo do dossel, distanciado a 0,30 m deste, a qual proporcionou um ângulo θv correspondente a 0° (nadir) e um sentido paralelo às fileiras de plantas quanto à projeção do feixe de luz emitido pelo equipamento; e posicionamento do sensor na lateral do dossel a uma distância de 0,80 m, o que resultou em ângulo θv de 90° (off nadir) e proporcionou um posicionamento perpendicular do feixe luminoso em relação ao dossel das videiras. Ambos os procedimentos de medida de ρ produziram estimativas dos IV com uma reduzida dispersão relativa em torno da média (Figura 11). O NDRE demonstra maior concordância quanto à sobreposição de zonas homogêneas do vigor vegetativo em cada um dos posicionamentos do sensor. Contudo, medidas de ρ realizadas no topo do dossel resultam em maior semelhança no mapeamento e delimitação de zonas homogêneas de NDRE e NDVI (Farinassi et al., 2022).

Outro atributo da planta que pode ser utilizado para caracterizar a variabilidade espacial do vinhedo é o teor foliar de clorofila. A variação na sua distribuição, associada à progressão do ciclo fenológico da videira, pode ocorrer em vinhedos em decorrência da variabilidade das condições ambientais e das propriedades intrínsecas das plantas. A tendência de variação e a estabilidade temporal dos índices de clorofila *a*, *b* e clorofila total (Chl*a*, Chl*b* e Chl*t*, respectivamente) e a caracterização da dis-

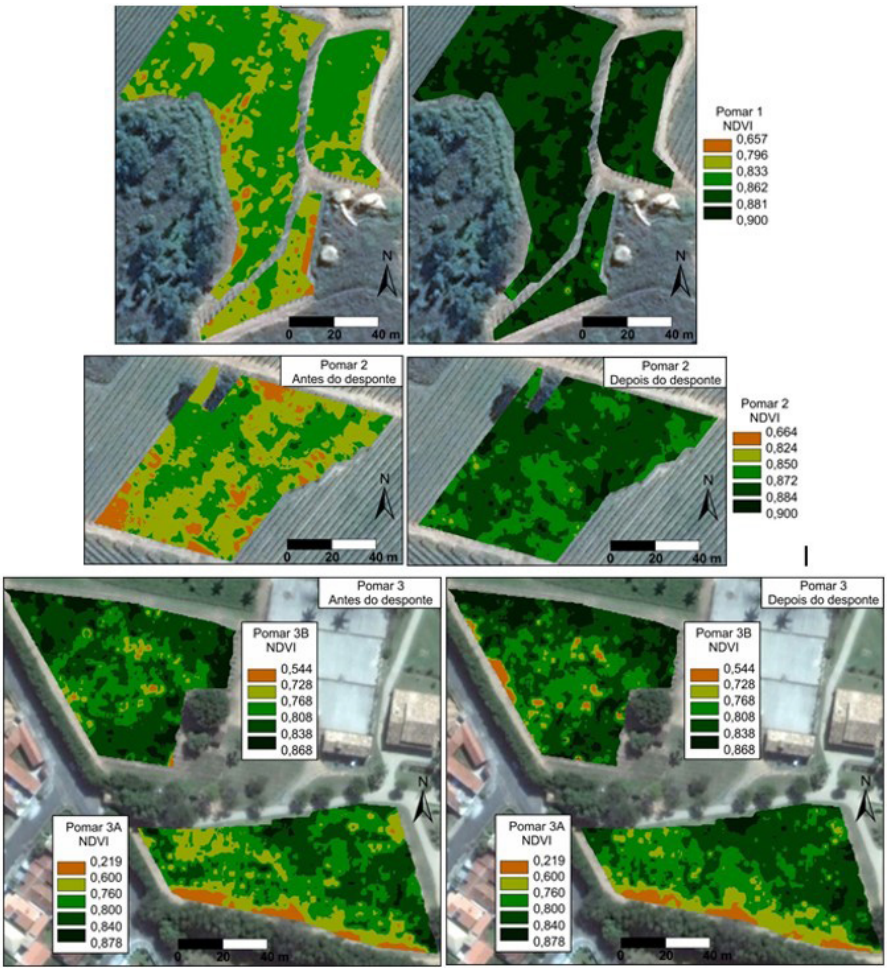


Figura 9. Distribuição espacial do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), antes (esquerda) e depois (direita) do desponte da videira. Fonte: Oldoni et al. (2018c).

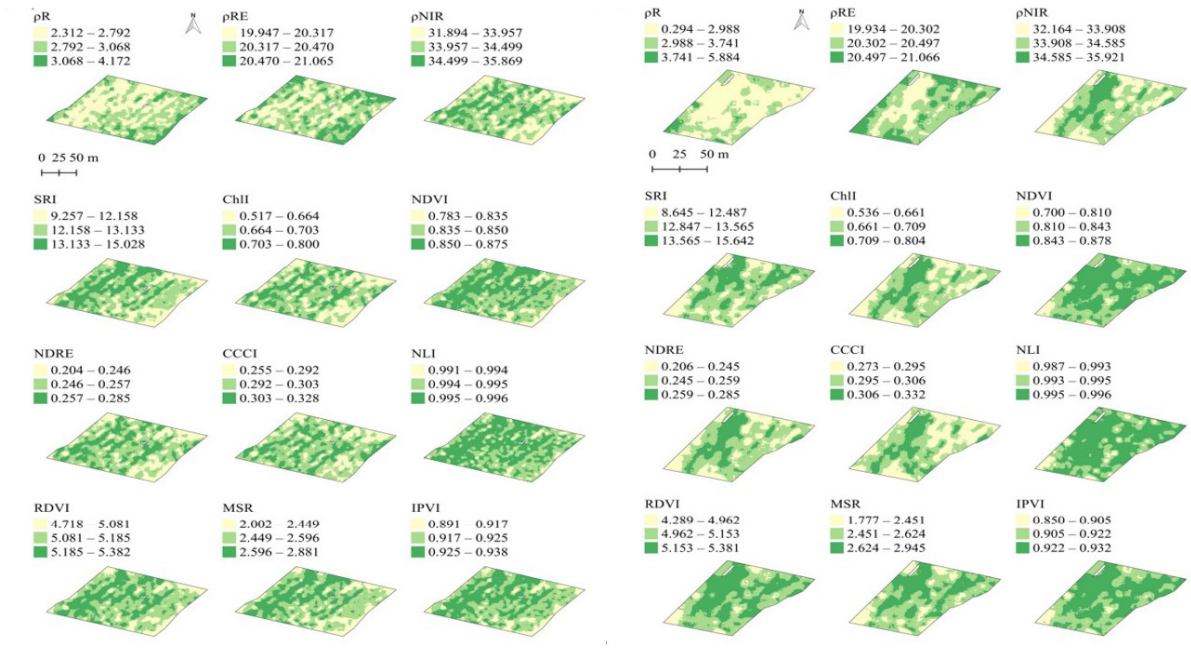


Figura 10. Distribuição espacial de zonas homogêneas da reflectância nas bandas vermelho (ρR), vermelho próximo (ρRE) e infravermelho próximo (ρNIR) e índices de vegetação (SRI – *simple ratio index*; ChlI – *chlorophyll index*; NDVI – *normalized difference vegetation index*; NDRE – *normalized difference red edge*; CCCI – *canopy content chlorophyll index*; NLI – *non-linear vegetation index*; RDVI – *re-normalized difference vegetation index*; MSR – *modified simple ratio*; IPVI – *infrared percentage vegetation index*) em vinhedo "Cabernet Franc" (esquerda) e "Cabernet Sauvignon" (direita) (Costa et al., 2019a).

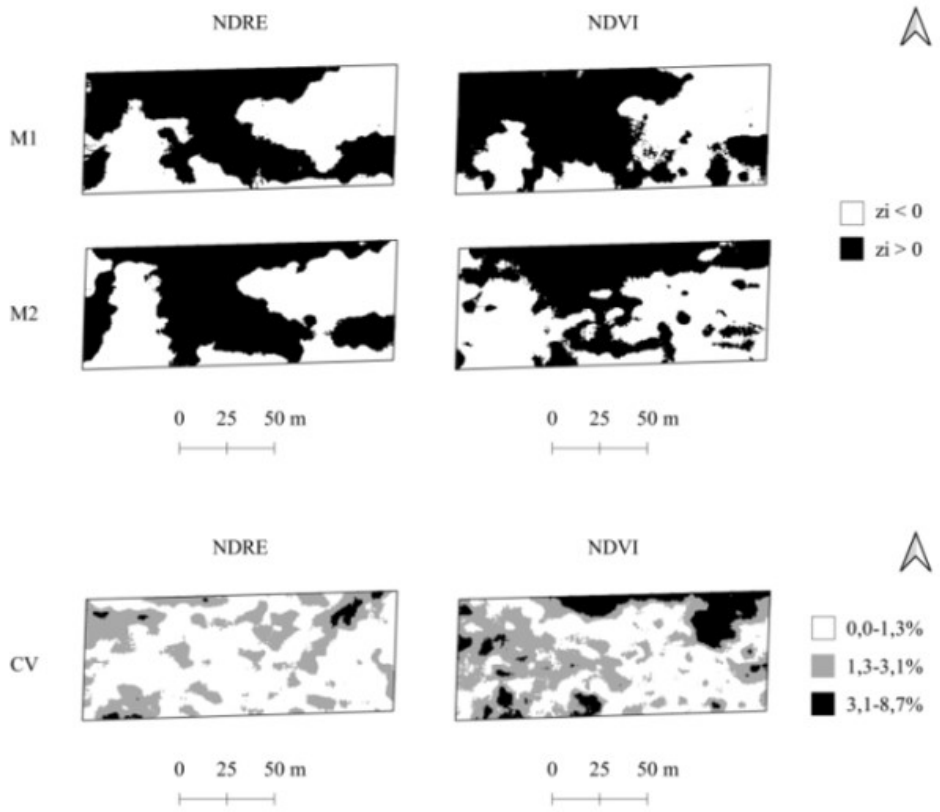


Figura 11. Mapas temáticos representativos da categorização de valores interpolados normalizados correspondentes ao NDVI e NDRE e do coeficiente de variação (CV), obtidos pela adoção de dois posicionamentos para medida da reflectância ρ no topo (M1) e na lateral (M2) do dossel de videiras (Farinassi et al., 2022).

tribuição espacial de Chl*t* entre a floração e a maturação dos frutos da videira "Chardonnay" foram avaliadas por Costa et al. (2019b) em Espírito Santo do Pinhal (SP). Os índices foram obtidos por meio de um medidor portátil ClorofiLog 130. A variação média dos índices Chl*b* e Chl*t* nas folhas da videira "Chardonnay" ao longo de seu ciclo pode ser representada pela tendência quadrática utilizada para estimar a redução do teor de clorofila *b* e clorofila total após o início da maturação dos frutos. Em contraste, altos valores médios do índice Chl*a* ainda são detectados após o início desse estágio. O índice Chl*t* apresentou baixa estabilidade temporal e espacial no período entre a floração e a plena maturação dos frutos em dois vinhedos geograficamente próximos, sob condições de cultivo e manejo semelhantes. No entanto, o período que precedeu o início da maturação dos frutos foi associado a uma maior estabilidade temporal das medidas indiretas do teor de clorofila total, com maior similaridade entre mapeamentos categóricos consecutivos dessa variável (Figura 12).

A calibração de medidores portáteis de clorofila é outro aspecto a ser considerado para que possamos ter não somente a distribuição espacial do índice relativo de clorofila em um vinhedo, mas também estimativa do teor foliar desse pigmento e do nitrogênio. Silva et al. (2022) propuseram um procedimento para definir as equações de calibração e validação do medidor portátil de clorofila ClorofiLOG CFL 130 com base nas zonas homogêneas do NDVI, determinada em um vinhedo "Chardonnay" irrigado por gotejamento em Espírito Santo do Pinhal (SP). Foi demonstrado que o dispositivo é capaz de estimar os níveis de Chl*a*, Chl*b* e Chl*t* com um coeficiente de determinação de 0,68, 0,60 e 0,72 para modelo de calibração, e de 0,75, 0,67 e 0,76 para modelo de predição, respectivamente. Além disso, foram encontrados erros de 0,98, 0,58 e 1,47 μg ml^{-1} cm^{-2} para o modelo de calibração, e 1,03, 0,67 e 1,49 μg ml^{-1} cm^{-2} para o modelo de predição, respectivamente. Quanto ao teor foliar de N, o coeficiente de determinação foi de 0,67 para o modelo de predição e 0,26 para o modelo de calibração, enquanto o erro foi de 1,49 e 3,39 g kg^{-1}, respectivamente. Mesmo diante de suas limitações, o medidor portátil é capaz de fornecer ao usuário a estimativa do estado de N da folha, especialmente quando opera em amplitudes maiores de N.

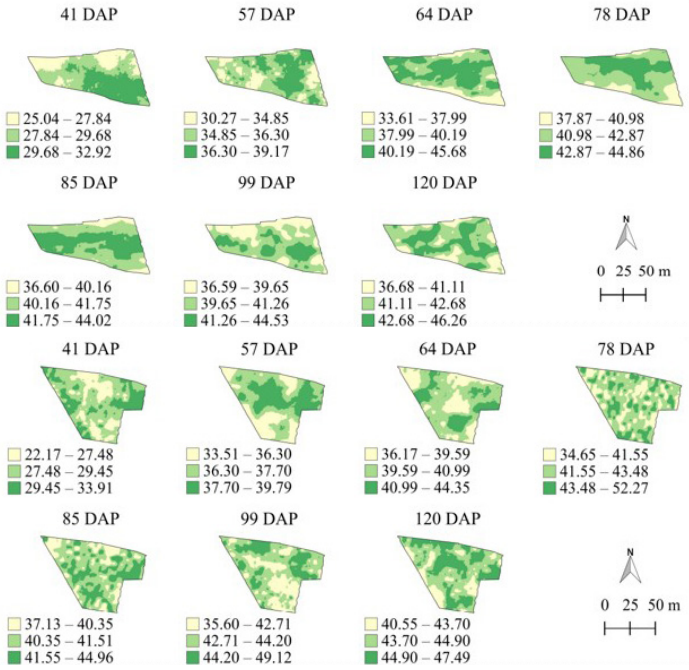


Figura 12. Distribuição espacial do índice de clorofila total (*Chlt*) nas folhas da videira "Chardonnay" estimada em diferentes dias após a poda (DAP) nos vinhedos 1 (acima) e 2 (abaixo) e agrupada em três categorias (Costa et al., 2019b).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A delimitação de zonas homogêneas em um vinhedo pode ser feita com base na determinação da variabilidade espacial de atributos do solo e da planta. Diversos procedimentos podem ser utilizados, cabendo ao viticultor ou técnico definir o atributo que melhor represente a variabilidade espacial do vinhedo, bem como o procedimento que melhor se adeque às características da sua área de produção e ao seu conhecimento técnico sobre a prática da viticultura de precisão.

AGRADECIMENTOS

Às vinícolas Guaspari (Espírito Santo do Pinhal, SP), Terras Altas (Ribeirão Preto, SP) e Casa Verrone (Itobi, SP), pela disponibilização de seus vinhedos e infraestrutura para a realização de experimentos no modelo *on winery research*. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas de estudo, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) processo 2021/07915-0 pelo apoio financeiro à realização do projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ARNÓ, J.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A.; RIBES-DASI, M.; ROSELL, J.R. Review. Precision Viticulture. Research topics, challenges and opportunities in site-specific vineyard management. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.7, p.779-790, 2009. DOI: https://doi.org/10.5424/sjar/2009074-1092.

BRAMLEY, R. G. V.; TROUGHT, M. C. T.; PRAAT, J. P. Vineyard variability in Marlborough, New Zealand: characterizing variation. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. 17, n. 1, p. 72-78, 2011. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2010.00119.x.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 11-43, 2005. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.005.

COSTA, B. R. S.; OLDONI, H.; ROCHA JÚNIOR, R.; BASSOI, L. H. Delimitation of homogeneous zones in vineyards using geostatistics and multivariate analysis of different vegetation indices. **Engenharia Agrícola**, v. 39, Espe, p.13-22, 2019a. DOI: https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39nep13-22/2019.

COSTA, B. R. S.; FARINASSI, L. G.; RABELLO, L. M.; VAZ, C. M. P.; BASSOI, L. H. Variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente ao longo do perfil do solo de vinhedos comerciais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO E INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2022, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: AsBraAP, 2022. p. 204-208.

COSTA, B. R. S.; OLDONI, H.; SILVA, W. A.; MARTINS, R. L.; BASSOI, L. H. Temporal variation and spatial distribution of relative indices of leaf chlorophyll in grapevine cv. Vhardonnay. **Engenharia Agrícola**, v. 39, Espe, p.74-84, 2019b. DOI: https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39nep74-84/2019.

FARINASSI, L. G.; OLDONI, H.; BASSOI, L. H.; COSTA, B. R. S. Diferentes métodos de sensoriamento proximal do dossel de videiras promovem divergências no mapeamento de índices de vegetação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO E INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2022, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: AsBraAP, 2022. p. 196-203.

GALAZ, B.; REGINA, M. A.; CÂMARA, F. M. M.; LUCA, O. F. Histórico e situação atual da produção de vinhos de inverno no Brasil. **Informe Agropecuário**, v. 41, n. 312, p. 7-13, 2020.

HALL, A.; LAMB, D.; HOLZAPFEL, B.; LOUIS, J. Optical remote sensing applications in viticulture - A review. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. 8, p. 36-47, 2002.

MATHEWS, A. J. Applying geospatial tools and techniques to viticulture. **Geography Compass**, v. 7, n. 1, p. 22-34, 2013. DOI: https://doi.org/10.1111/gec3.12018.

MOLIN, J.P.; CASTRO, C. N. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 6, p. 567-573, 2008. DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000600001.

OLDONI, H.; MARTINS, R. L.; VAZ, C. M. P.; BASSOI, L. H. Delineamento de zonas de manejo de irrigação em vinhedo com base na granulometria do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2018a, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: AsBraAP, 2018a. p. 52-58.

OLDONI, H.; COSTA, B. R. S.; RABELLO, L. M.; BASSOI, L. H. Apparent soil electrical conductivity as a guidance for canopy management in vineyards. In: 5th GLOBAL WORKSHOP ON PROXIMAL SOIL SENSING, 2019a, Columbia. **Proceedings**... Columbia: USDA ARS/University of Missouri, 2019a. p. 105-110.

OLDONI, H.; MARTINS, R. L.; RABELLO, L. M.; BASSOI, L. H. Distribuição espacial do NDVI de videiras de vinho em função do desponte de ramos. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN, 1., 2018, Santiago. **Anais [...]**. Santiago: Sociedade Chilena de Agricultura de Precisión, 2018c. p.1-8.

OLDONI, H.; COSTA, B. R. S.; ROCHA JUNIOR, R. C.; RABELLO, L. M.; BASSOI, L. H. Effects of size and sampling grid on the quality of apparent soil electrical conductivity maps. **Engenharia Agrícola**, v. 39, Espe, p. 1-12, 2019b. https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39nep1-12/2019.

OLDONI, H.; ROCHA JUNIOR, R. C.; MARTINS, R. L.; RABELLO, L. M.; BASSOI, L. H. Impacto da redução da densidade amostral na qualidade de mapas de NDVI em pomares de videira de vinho. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN, 1., 2018b, Santiago. **Anais [...]**. Santiago: Sociedade Chilena de Agricultura de Precisión, 2018b. p.1-9.

OLDONI, H. **Zonas homogêneas de atributos de planta e do solo em vinhedo irrigado**. 2019. 104 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Unesp, Botucatu, 2019.

RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C; NAIME, J. M.; MOLIN, J. P. Mapeamento da condutividade elétrica do solo – sistema protótipo. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C (eds.). **Agricultura de precisão:** um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 41-45.

ROSSI, R.; POLLICE, A.; DIAGO, M. P.; OLIVEIRA, M.; MILLAN, B.; BITELLA, G.; AMATO, M.; TARDAGUILA, J. Using an automatic resistivity profiler soil sensor on-the-go in precision viticulture. **Sensors**, v. 13, n. 1, p. 1121-1136, 2013. DOI: https://doi.org/10.3390/s130101121.

SILVA, T. M. M.; COSTA, B. R. S.; OLDONI, H.; MITSUYUKI, M. C.; BASSOI, L. H. Calibration of chlorophyll hand-held meter based on vineyard NDVI zones for estimation of leaf N content. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 46, p. e006222, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/1413-7054202246006222.

TARDAGUILA, J.; BALUJA, J.; ARPON, L.; BALDA, P.; OLIVEIRA, M. Variations of soil properties affect the vegetative growth and yield components of "Tempranillo" grapevines. Precision Agriculture, v.12, p.762-773, 2011. DOI: https://doi.org/10.1007/s11119-011-9219-4.

TISSEYRE, B.; OJEDA, H.; TAYLOR, J. New technologies and methodologies for site-specific viticulture. **Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin**, v. 41, n. 2, p. 63-76, 2007.

URRETAVIZCAYA, I.; ROYO, J. B.; MIRANDA, C.; TISSEYRE, B.; GUILLAUME, S.; SANTESTEBAN, L. G. Relevance of sink-size estimation for within-field zone delineation in vineyards. **Precision Agriculture**, v. 18, p. 133-144, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/s11119-016-9450-0.

Viticultura de precisão na produção de vinhos de colheita de inverno

61

Precision viticulture in the production of wines from winter grape harvest

Luís Henrique Bassoi[1], Henrique Oldoni[2], Bruno Ricardo Silva Costa[3], Thassio Monteiro Menezes da Silva[4], Larissa Godarelli Farinassi[5], Anderson de Jesus Pereira[6], Claudia Rita de Souza[7], Lucas Bueno do Amaral[8], Renata Vieira da Mota[9], Francisco Mickael de Medeiros Câmara[10], Angelica Bender[11]

[1] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, luis.bassoi@embrapa.br*
[2] *Pós-graduando, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Faculdade de Ciências Agronômicas, Departamento de Engenharia Rural e Seocioeconomia, Botucatu (SP), henriqueoldoni@gmail.com*
[3] *Pós-graduando, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Faculdade de Ciências Agronômicas, Departamento de Engenharia Rural e Seocioeconomia, Botucatu (SP), bruno.ricardo.silva@hotmail.com*
[4] *Pós-graduando, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Faculdade de Ciências Agronômicas, Departamento de Engenharia Rural e Seocioeconomia, Botucatu (SP), thassio_monteiro@hotmail.com*
[5] *Pós-graduando, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Faculdade de Ciências Agronômicas, Departamento de Engenharia Rural e Seocioeconomia, Botucatu (SP), larissa_godarelli@hotmail.com*
[6] *Pós-graduando, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Faculdade de Ciências Agronômicas, Departamento de Engenharia Rural e Seocioeconomia, Botucatu (SP), agroandersonn@gmail.com*
[7] *Pesquisador, Núcleo Tecnológico EPAMIG Uva e Vinho, Caldas (MG), Brasil, crsouza@epamig.br*
[8] *Pesquisador, Núcleo Tecnológico EPAMIG Uva e Vinho, Caldas (MG), Brasil, lucasbamaral@gmail.com*
[9] *Pesquisador, Núcleo Tecnológico EPAMIG Uva e Vinho, Caldas (MG), Brasil, rvmota@epamig.br*
[10] *Pesquisador, Núcleo Tecnológico EPAMIG Uva e Vinho, Caldas (MG), Brasil, francisco.camara@epamig.br*
[11] *Pesquisador, Núcleo Tecnológico EPAMIG Uva e Vinho, Caldas (MG), Brasil, angelica.bender@epamig.br*

RESUMO

A delimitação de zonas de manejo em vinhedos, a partir de zonas homogêneas de atributos de solo e de planta, é discutida neste capítulo. Essas zonas possibilitam a realização de práticas de manejo diferenciado, como a colheita seletiva de uvas para vinificação. Também são reportadas as diferenças das características dos vinhos de colheita de inverno obtidos no Sudeste do Brasil a partir das uvas oriundas de diferentes zonas de manejo.

Palavras-chave: variabilidade espacial; sensoriamento proximal; sensoriamento suborbital; composição do vinho; viticultura de precisão.

ABSTRACT

This chapter presents the delimitation of management zones based on homogeneous soil and plant attributes, which enables the implementation of differentiated management practices, such as the selective harvesting of grapes during the winter for winemaking in Southeast Brazil. Additionally, various differences in wine characteristics are reported.

Key words: spatial variability; proximal sensing; suborbital sensing; wine properties; precision viticulture.

1 INTRODUÇÃO

O conceito de zonas de manejo é diferente da ideia de zonas homogêneas. No segundo caso, muitas vezes são delimitadas regiões que possuem uniformidade em termos de um ou poucos parâmetros que se quer manejar. Porém, o conceito de zonas de manejo é mais amplo, pois as regiões delimitadas devem apresentar combinação semelhante de fatores limitantes à produtividade e/ou qualidade de produção das plantas, de modo que o padrão de manejo da área possa ser alterado. Esse tipo de abordagem permite variar os níveis de fertilidade do solo com base no potencial produtivo, adequar o manejo fitossanitário e o manejo

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000034

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

do solo com base nas restrições de cada zona, entre várias outras possibilidades. As camadas de informação utilizadas na análise para definição das zonas de manejo devem ser selecionadas com bastante critério técnico. Ainda, as zonas de manejo devem ser estáveis ao longo do tempo. No entanto, elas não são totalmente imutáveis, pois os fatores causadores de variabilidade e limitação à produtividade podem se alterar; porém, não deve haver alterações frequentes, caso contrário o agricultor nunca verá o real retorno da adequação gradual do manejo para cada zona. Dessa forma, as camadas de informação que devem ser levadas em consideração para a delimitação das zonas de manejo devem apresentar estabilidade ao longo das safras, ou seja, não devem ser facilmente alteradas com o manejo (Amaral; Figueiredo, 2022).

Uma breve revisão bibliográfica acerca do tema viticultura de precisão (VP) revela que os termos "zonas de manejo" (Martinez-Casasnovas et al., 2012; Tagarakis et al., 2013; Urretavizcaya et al., 2014; Balafoutis et al., 2017; Tagarakis et al., 2018; Brillante et al., 2020) e "zonas homogêneas" (Priori et al., 2013; Tardaguila et al., 2017; Costa et al., 2019; Ortuani et al., 2019a; Oldoni et al., 2021), ou alguma variação desses (Bonfante et al., 2015; Matese; Di Gennaro, 2018; Ortuani et al., 2019b), têm sido reportados de forma equivalente em alguns casos quanto a sua concepção. Não obstante essa diferença conceitual, ambos os termos designam regionalizações de um determinado vinhedo que apresentam características intrínsecas uniformes no que se refere às propriedades físico-químicas e hídricas do solo (Tardaguila et al., 2011; Tardaguila et al., 2017; Brillante et al., 2020; Yu et al., 2020) e/ou às características das videiras, em termos de desenvolvimento vegetativo, produção, composição e qualidade de bagas (Rey-Caramés, et al., 2015; Costa et al., 2019; Oldoni et al., 2021). Destaca-se ainda que tais zonas podem ser definidas a partir de uma única variável, ou ainda pela análise simultânea de diversas variáveis em um mesmo vinhedo.

A definição de zonas compreende uma das principais áreas de estudo de VP, juntamente com a quantificação e avaliação da variabilidade dos vinhedos, o desenvolvimento de tecnologias de aplicação à taxa variável e a avaliação de oportunidades para a gestão e manejo diferenciado (Arnó et al., 2009). Posteriormente, é a validação das diferenças identificadas entre as zonas delimitadas que ampara a adoção de práticas de manejo sítio-específico, conforme preconizado pela VP. Nesse contexto, o zoneamento dos vinhedos é frequentemente praticado para fins de colheita seletiva (Trought; Bramley, 2011; Martinez-Casasnovas et al., 2012; Priori et al., 2013), uma vez que as características naturais das áreas de cultivo influenciam na composição de uvas e vinhos e denotam o *terroir* das localidades produtoras, mas outras aplicações dessa demarcação podem ser identificadas (Ortuani et al., 2019a).

De forma geral, independentemente do termo adotado, a definição de tais regiões uniformes é possível graças ao exame da variabilidade espacial preexistente nas áreas de produção de videiras, comumente percebida por viticultores, mesmo em vinhedos de menor dimensão. O reconhecimento da variabilidade de características dos vinhedos, especialmente relacionadas aos aspectos de desenvolvimento vegetativo, conforme propriedades ópticas do dossel das plantas, é normalmente realizado com o auxílio de técnicas de sensoriamento remoto, suborbital ou proximal (Ammoniaci et al., 2021). O sensoriamento proximal também torna possível a análise de propriedades do solo para fins de identificação da variabilidade espacial dessas, como a condutividade elétrica aparente (CEa), a qual demonstra uma associação com demais propriedades de importância, i.e., a textura e umidade do solo.

2 ZONAS DE MANEJO EM VINHEDO PARA PRODUÇÃO DE VINHOS DE COLHEITA DE INVERNO

O conceito de agricultura de precisão (AP) vem sendo empregado na viticultura tendo em vista a adoção de práticas de manejo sítio-específico a partir da caracterização da variabilidade espacial das áreas cultivadas. Nesse sentido, diversos atributos do solo e da planta podem ser adotados como variáveis regionalizadas representativas da condição dos vinhedos, uma vez que expressa a interação dos diversos fatores ambientais predominantes nesses sistemas agrícolas.

Em Itobi (SP), foram definidos mapas de distribuição espacial de CEa nas camadas de 0-0,2 m e a 0-0,4 m e de umidade do solo na camada de 0-0,2 m, os quais foram utilizados para a definição de duas zonas de colheita seletiva de uvas em um vinhedo "Syrah" (Figura 1).

Em razão da sua relevância para adoção de práticas de AP, o vigor vegetativo em um vinhedo pode ser monitorado intensivamente por tecnologias de georreferenciamento e sensoriamento que permitem a estimativa e predição espacial de índices de vegetação (IV). Diversos IVs podem estar relacionados com o desenvolvimento vegetativo da cultura. A partir do conhecimento de sua distribuição espacial, diversas características espaciais de qualidade e produção do vinhedo podem ser inferidas e manejadas de modo diferenciado no espaço. O monitoramento da maturação das bagas, por exemplo, pode ser realizado em diferentes locais do vinhedo, baseado na variabilidade espacial do vigor vegetativo (Oldoni et al., 2021).

A partir de diferentes pontos de maturação identificados nas diferentes zonas de vigor vegetativo, uma colheita seletiva pode ser realizada em cada zona, buscando a produção de diferentes vinhos ou mesmo colher cada zona no ponto de maturação mais adequado, quando operacionalmente viável.

Alguns estudos exemplificam esse potencial em vinhedos com produção de uvas finas para vinhos de colheita de inverno. Em um vinhedo "Chardonnay" irrigado por gotejamento em Espírito Santo do Pinhal (SP), Oldoni et al. (2021) realizaram, em dois ciclos de produção consecutivos, a medida do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) por meio do sensor ativo Crop Circle ACS-430, após o início da maturação das bagas (aos 92 e 101 dias após a poda, respectivamente, em 2017 e 2018). Para comprovar a relação entre a distribuição espacial do IV e o vigor vegetativo das videiras, os autores avaliaram e verificaram diferença da massa fresca dos ramos podados entre zonas de NDVI, onde a massa foi maior nas zonas de maior NDVI, ou seja, maior vigor vegetativo. As zonas homogêneas de NDVI foram utilizadas para a realização de colheita seletiva ou diferenciada de uvas, podendo ser caracterizadas como zonas de manejo (Figura 2). Neste caso, foi possível utilizar o NDVI sem problemas de saturação do índice, em ra-

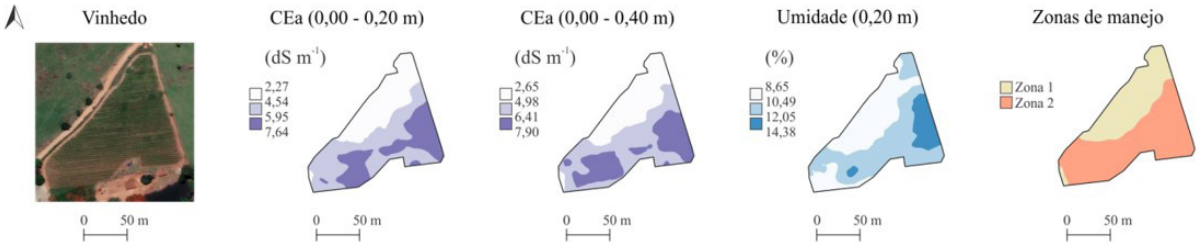


Figura 1. Vinhedo "Syrah" e respectivos mapas da condutividade elétrica aparente (CEa) a 0-0,2 m e 0-0,4 m, umidade do solo e zonas de manejo.

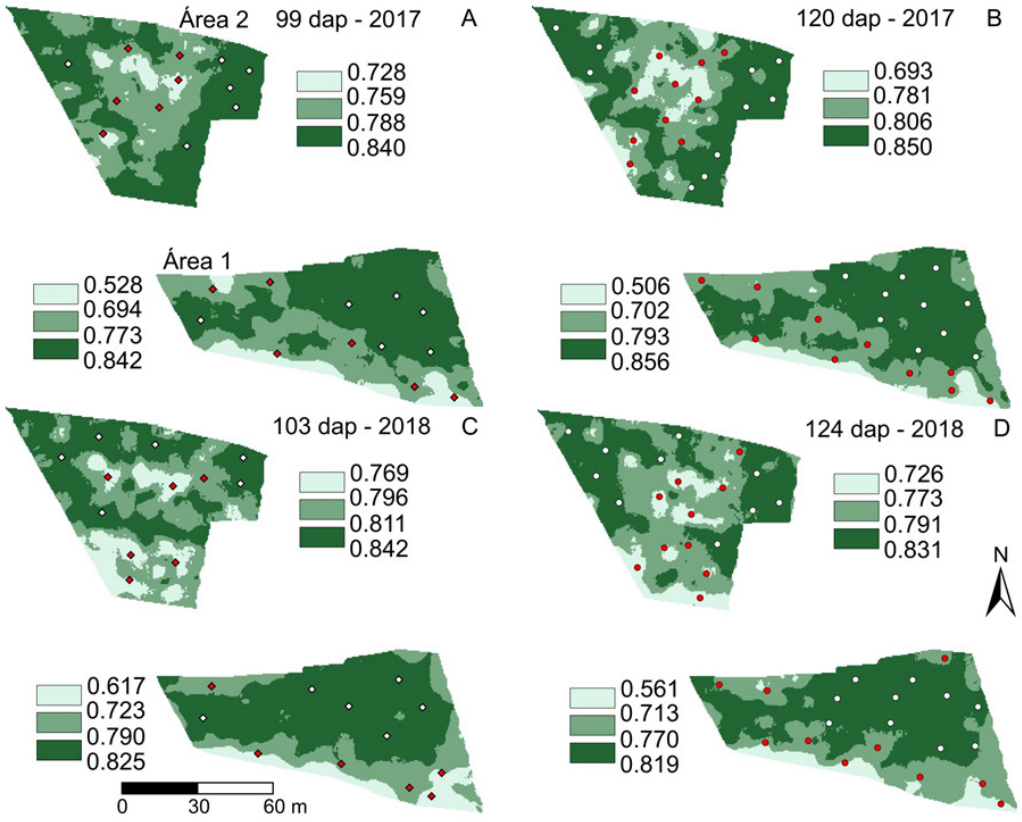


Figura 2. Distribuição espacial do NDVI aos 99 (A) e 120 (B) dias após a poda (dap) nos ciclos de produção de uva em 2017 e aos 103 (C) e 124 dap (D) em 2018 nas áreas 1 e 2 do vinhedo "Chardonnay". A amostragem de bagas foi realizada nas zonas de alto (losango branco) e baixo NDVI (losango vermelho) em A e C. A amostragem das videiras foi realizada nas zonas de alto (círculo branco) e baixo NDVI (círculo vermelho) em B e D (Oldoni et al., 2021).

zão de o vinhedo apresentar um baixo vigor vegetativo. A saturação do NDVI ocorre quando o nível elevado de clorofila, geralmente presentes em plantas muito vigorosas, diminui a sensibilidade do índice.

Outros atributos da planta e de produção foram avaliados nas diferentes zonas de NDVI desse estudo. Um deles foi a quantidade de água presente nas folhas, medida com base no potencial de água na folha, e que foi menor nas zonas com menor NDVI. Nestas, as taxas de fotossíntese e transpiração foram reduzidas em 15%, enquanto a abertura estomática foi reduzida em 21%, em comparação com as zonas de maior NDVI. O número de cachos, a massa média dos cachos e a produtividade foram maiores nas zonas de maior NDVI. Dessa forma, os autores mostraram que os mapas de distribuição espacial desse IV possibilitam o conhecimento sobre a variabilidade do vigor vegetativo e a possibilidade de realização de colheita seletiva de uvas, além de orientar o monitoramento da maturação, trocas gasosas, potencial de água na folha e produção, de forma a garantir a aquisição de informação de melhor qualidade sobre a variabilidade no vinhedo.

Em vinhedos "Cabernet Franc" e "Cabernet Sauvignon" irrigados por gotejamento em Espírito Santo do Pinhal (SP), e com plantas sustentadas por espaldeiras, o monitoramento por meio do sensor proximal Crop Circle ACS-430, após o início da maturação das uvas e em dois ciclos de produção consecutivos, possibilitou a obtenção de mapas de zonas homogêneas de NDVI e NDRE, o índice do vermelho próximo por diferença normalizada (Figura 3), como indicadores do vigor vegetativo das videiras, bem como orientar a colheita diferenciada ou seletiva de uvas (zonas de manejo). Devido ao alto vigor vegetativo de ambas as cultivares, as predições do NDRE e NDVI apresentaram elevada estabilidade temporal, espacial e similaridade no padrão de distribuição dos seus valores (Costa, 2021).

Em Ribeirão Preto (SP), em uma área de 1,1 ha com a videira "Syrah" conduzida por espaldeiras, irrigada por gotejamento e enxertada sobre os porta-enxertos "IAC 572" e "Paulsen '1103", o delineamento de duas zonas de manejo com base na CEa, umidade do solo e NDVI (Figura 4) possibilitou a determinação de diferentes características das uvas em dois ciclos de produção consecutivos. A título de comparação de metodologias, foram confeccionados em ambos os anos três mapas de zonas de manejo. O primeiro utilizou a normalização dos dados; o segundo, a padronização; e o terceiro, a análise multivariada. A análise de dados mais robusta foi a análise multivariada, havendo uma diferença pequena no formato das duas zonas de manejo Z1 e Z2 entre as safras, devido à alteração de alguns pixels na extremidade dessas duas zonas no canto direito inferior (Figura 4).Os porta enxertos, independentemente da divisão da área em zonas de manejo, também influenciaram nas características das uvas produzidas. A delimitação das zonas de manejo orientou a colheita das uvas e sua vinificação em separado, conforme a zona de produção (Farinassi, 2022).

Outra possibilidade para a definição de zonas homogêneas em vinhedos, as quais podem contribuir para gerar zonas de manejo, é por meio do uso de imagens de alta resolução espacial. Nesse mesmo vinhedo "Syrah", a reflectância do dossel foi medida na fase de maturação das uvas por meio da câmera multiespectral MicaSense RedEdge-M acoplada a uma aeronave remotamente tripulada (ARP) modelo DJI Inspire 2 (sensoriamento suborbital), e também pelo sensor ativo Crop Circle ACS-430 (sensoriamento proximal no topo do dossel). Os mapas dos índices NDVI, NDRE e MSR (razão simples modificada) foram gerados, oriundos de ambos os sensoriamentos, e comparados com as medidas da condutância estomática (g_s), obtida pelo porômetro SC-1; do índice relativo do teor foliar de clorofila total (IRC), mensurado pelo clorofilômetro clorofiLOG CFL 130; do teor relativo de água (TRA), obtido em laboratório; da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) na camada de 0-0,4 m, mensurada por um sensor portátil (Rabello et al., 2011); e umidade do solo (θ), obtida pelo sensor HSII na camada de 0-0,2m. As correlações dos IV do sensoriamento suborbital com g_s, TRA e IRC foram maiores que as correlações dos mesmos atributos da planta com os IV originados do sensoriamento proximal. O melhor coeficiente de determinação foi o do NDRE suborbital com g_s (70%) e com o TRA (57%). O sensoriamento remoto proximal também alcançou correlações significativas entre as variáveis comparadas, porém inferiores às da câmera multiespectral, com exceção da relação com a CEa a 0-0,4m, a qual foi positiva, mas muito baixa. O mapa de zonas de manejo obtido em função da integração de diversos atributos (Figura 5) pode orientar a realização de práticas agrícolas espacialmente diferenciadas no vinhedo (Pereira, 2022).

O produto gerado pela integração dos planos de informações (Figura 5) possibilitou diferenciar estatisticamente o TRA e o IRC entre as zonas de manejo. Os maiores valores dessas variáveis são encontrados na zona de manejo 2, que também reflete em uma maior umidade do solo, CEa e vigor vegetativo. A seleção do NDRE para integração da zona de manejo está associada às maiores correlações com os parâmetros biofísicos, como aqueles relacionados ao estado hídrico do dossel (Pereira, 2022). Embora o NDVI seja o índice vegetativo mais utilizado na agricultura, a determinação da variabilidade espacial pode ser comprometida em algumas situações devido à saturação em condições de

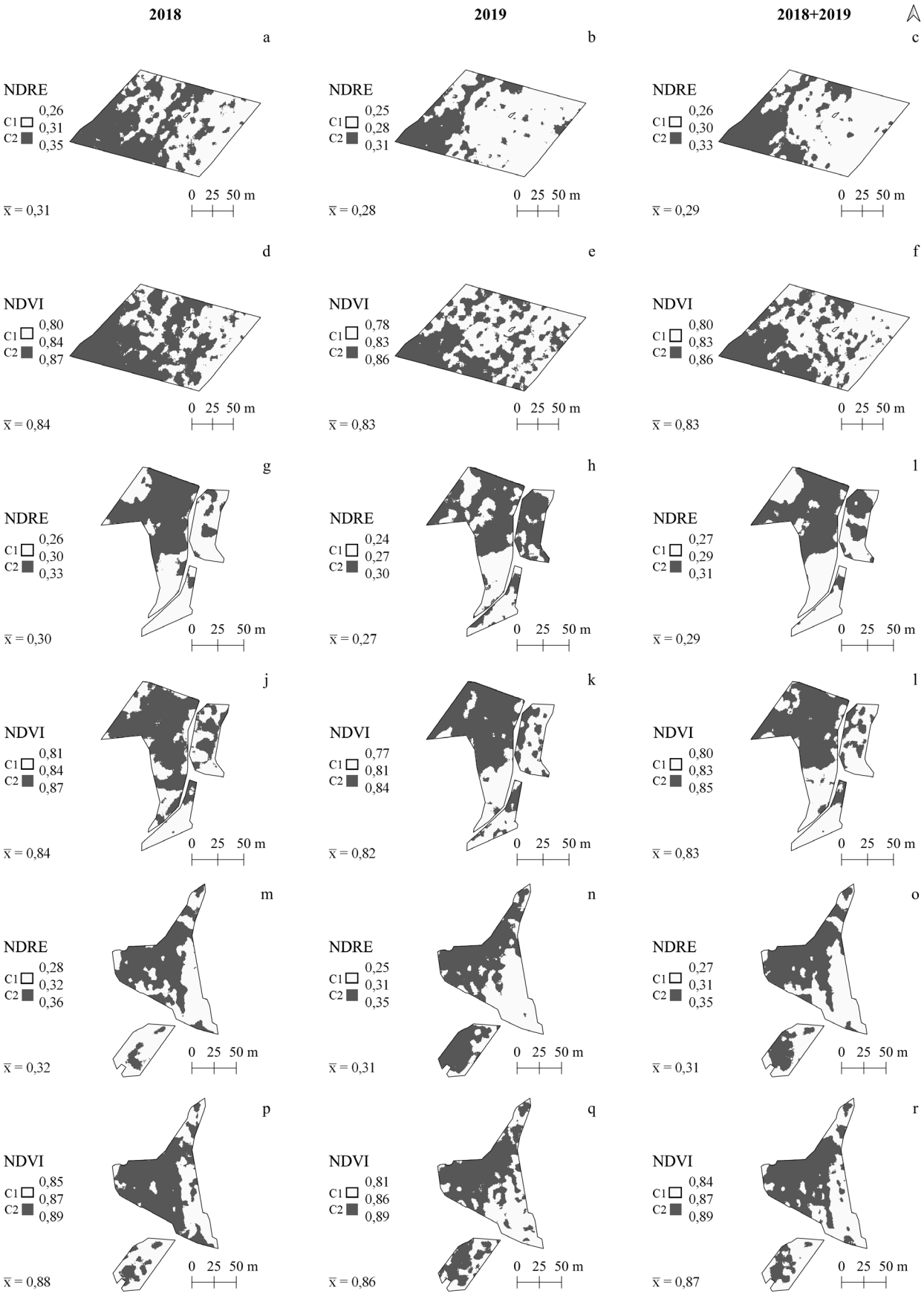


Figura 3. Zonas homogêneas baseadas no vigor vegetativo de videiras 'Cabernet Franc' (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l), e 'Cabernet Sauvignon' (m, n, o, p, q, r) agrupado em duas categorias (C1 baixo e C2 alto) delimitadas conforme a média dos valores interpolados e padronizados do NDRE e NDVI estimados durante os ciclos de produção de 2018 e 2019 (Costa, 2021).

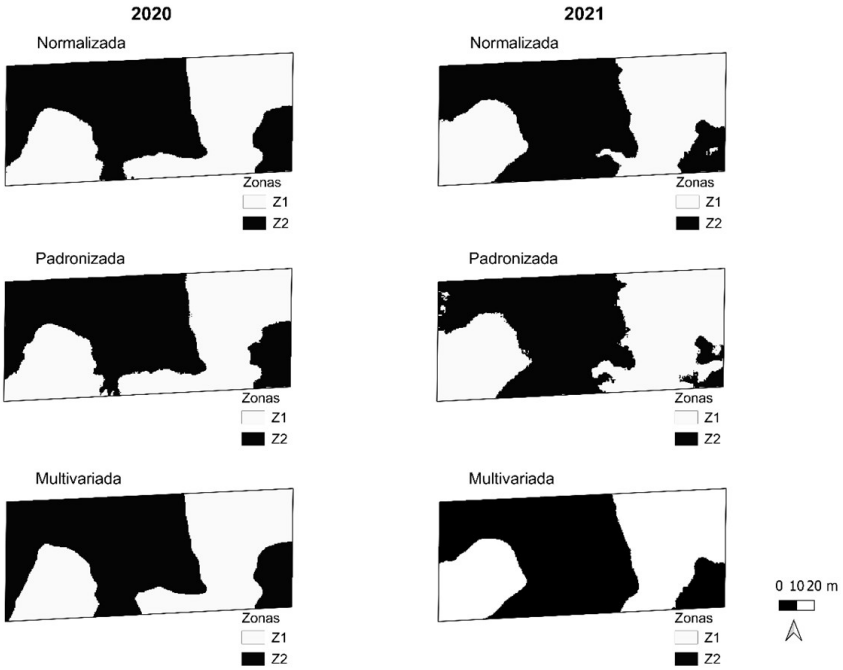


Figura 4. Mapas de zonas de manejo, obtidos pelas metodologias de normalização dos dados e padronização e análise multivariada dos dados, nos ciclos de produção de uvas em 2020 e 2021 (Farinassi, 2022).

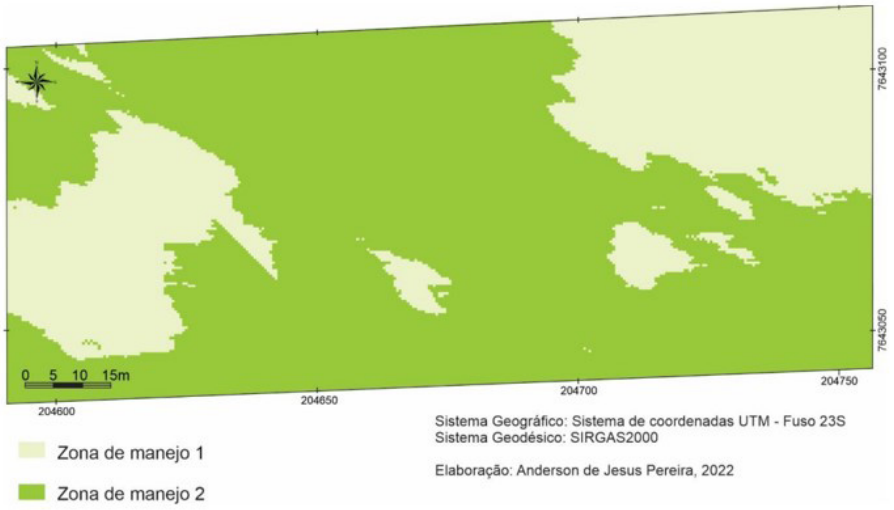


Figura 5. Mapa de zonas de manejos em um vinhedo "Syrah" obtido por meio da integração do NDRE suborbital, da condutividade elétrica aparente e da umidade do solo (Pereira, 2022).

média a alta densidade de biomassa e quando o índice de área foliar é elevado (Gitelson et al., 2002). Assim, ocorre uma insensibilidade em identificar as variações, e o NDVI estabiliza, subestimando o resultado. Nesse caso, a utilização do NDRE é aconselhável.

3 DISTINÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS VINHOS DE COLHEITA DE INVERNO EM FUNÇÃO DE ZONA DE MANEJO

A qualidade dos vinhos é um fator crucial para a competitividade desse produto no mercado, e a determinação de zonas de manejo em um vinhedo pode auxiliar na elaboração de um vinho com maior complexidade.

Em Espírito Santo do Pinhal (SP), o NDVI obtido com o sensor ativo Crop Circle® ACS-430 posicionado no topo do dossel e no início da fase de maturação das uvas (99 dias após a poda) da videira "Chardonnay", conduzida em espaldeira, foi utilizado para delimitar duas zonas de manejo (colheita seletiva). A zona com maiores valores de NDVI (> 0,8) apresentou maior número de cachos por planta, produtividade (kg planta^{-1}) e massa de ramos da poda do ciclo seguinte à colheita (Figura 6, esquer-

da). A avaliação do mosto indicou maior teor de alanina, um aminoácido que melhora a performance fermentativa das leveduras *Saccharomyces cerevisiae* (Kemsawasd et al., 2015) nas amostras da zona de maior NDVI. A análise de componentes principais dos dados espectrais dos vinhos de colheita de inverno mostrou uma clara discriminação entre as zonas de maior e menor NDVI (Figura 6, direita). A delimitação de zonas de manejo para fins de colheita seletiva com base no NDVI permitiu a produção de dois vinhos de composição química quantitativamente diferente (Oldoni et al., 2018).

Costa (2021) observou em um vinhedo comercial em Espírito Santo do Pinhal (SP), que os vinhos de colheita de inverno "Cabernet Franc" e "Cabernet Sauvignon" da safra 2018, elaborados a partir de uvas colhidas seletivamente em três zonas de NDVI como indicativo do maior e menor vigor vegetativo da videira, apresentaram características diferenciadas. As uvas das duas classes ou intervalos com menores valores do índice vegetativo foram vinificadas conjuntamente como sendo de uma única zona por questões operacionais (Figura 7)

Com base em duas zonas homogêneas de valores de CEa (alto e baixo), determinadas em um vinhedo

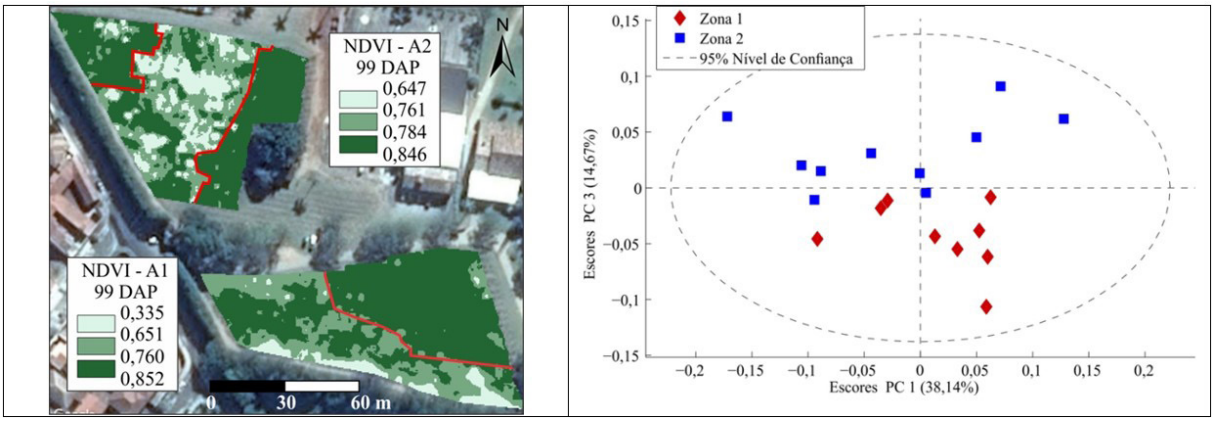


Figura 6. Mapas de NDVI aos 99 dias após a poda (DAP) nas áreas A1 (abaixo) e A2 (acima), com as zonas de manejo delimitadas – limite em vermelho (esquerda). Análise de componentes principais espectros de ressonância magnética nuclear de vinhos produzidos a partir das uvas da zona de manejo 1 – losangos vermelhos, e 2 – quadrados azuis (direita) (Oldoni et al., 2018).

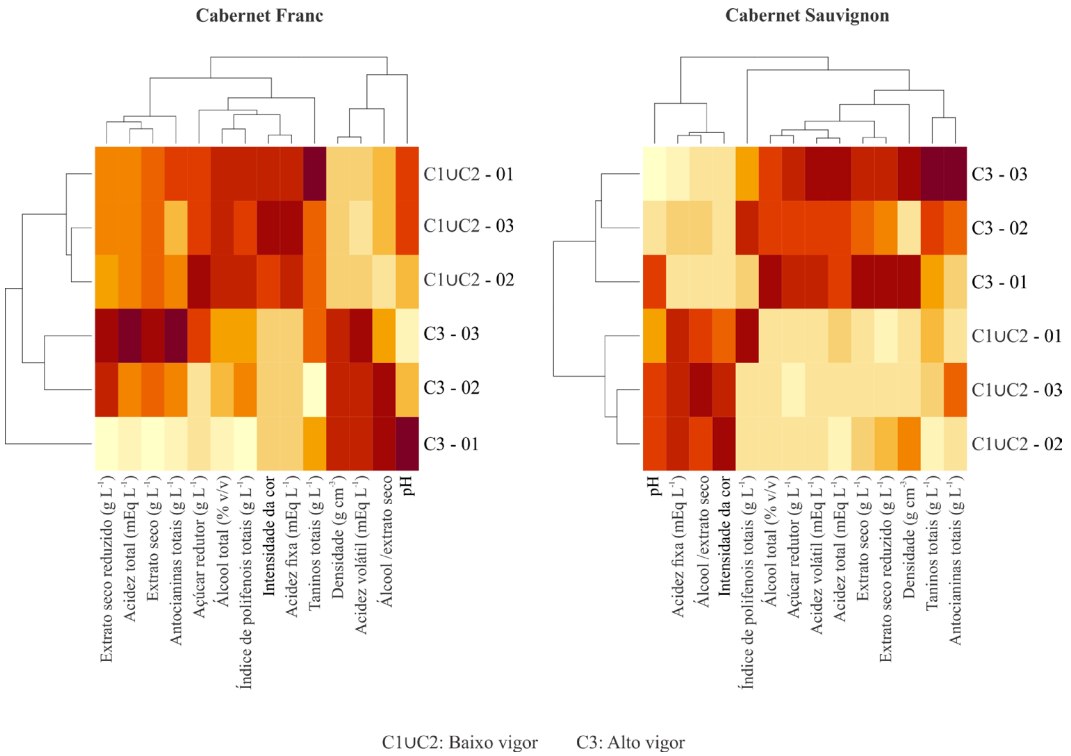


Figura 7. Análise de agrupamentos hierárquicos referente à composição dos vinhos "Cabernet Franc" e "Cabernet Sauvignon", produzidos em 2018, conforme a definição de duas zonas de manejo (Costa, 2021).

"Syrah" sobre porta-enxerto IAC 572, em Itobi (SP), as uvas foram colhidas seletivamente para a vinificação em separado. Apesar da proximidade entre as zonas, os vinhos apresentaram diferenças na composição química (Figura 8). A zona com maior teor de CEa favoreceu o acúmulo de compostos fenólicos no vinho, além de maior teor de extrato seco, álcool e acidez total.

Em Ribeirão Preto (SP), o vinho de colheita de inverno "Syrah", produzido em dois anos consecutivos, a partir de uvas colhidas em duas zonas de manejo estabelecidas com base na CEa, umidade do solo e do NDVI como indicativo do vigor vegetativo das videiras, apresentaram características distintas (Figura 9). Em 2020 as vinificações ocorreram em separado para porta-enxerto em cada zona de manejo. No ano de 2021, a vinificação foi realizada independente do porta-enxerto utilizado (IAC 572 e Paulsen 1103) no vinhedo de 1,1 ha, irrigado por gotejamento (Farinassi, 2022). Observa-se que o fator porta-enxerto apresenta grande influência na composição físico-química dos vinhos. Para fator zona de manejo, também é possível evidenciar diferenças, principalmente para o porta-enxerto IAC 572, onde a Z1 apresentou maiores concentrações de açúcar, extrato seco, álcool e fenólicos, indicando um vinho com maior potencial para pas-

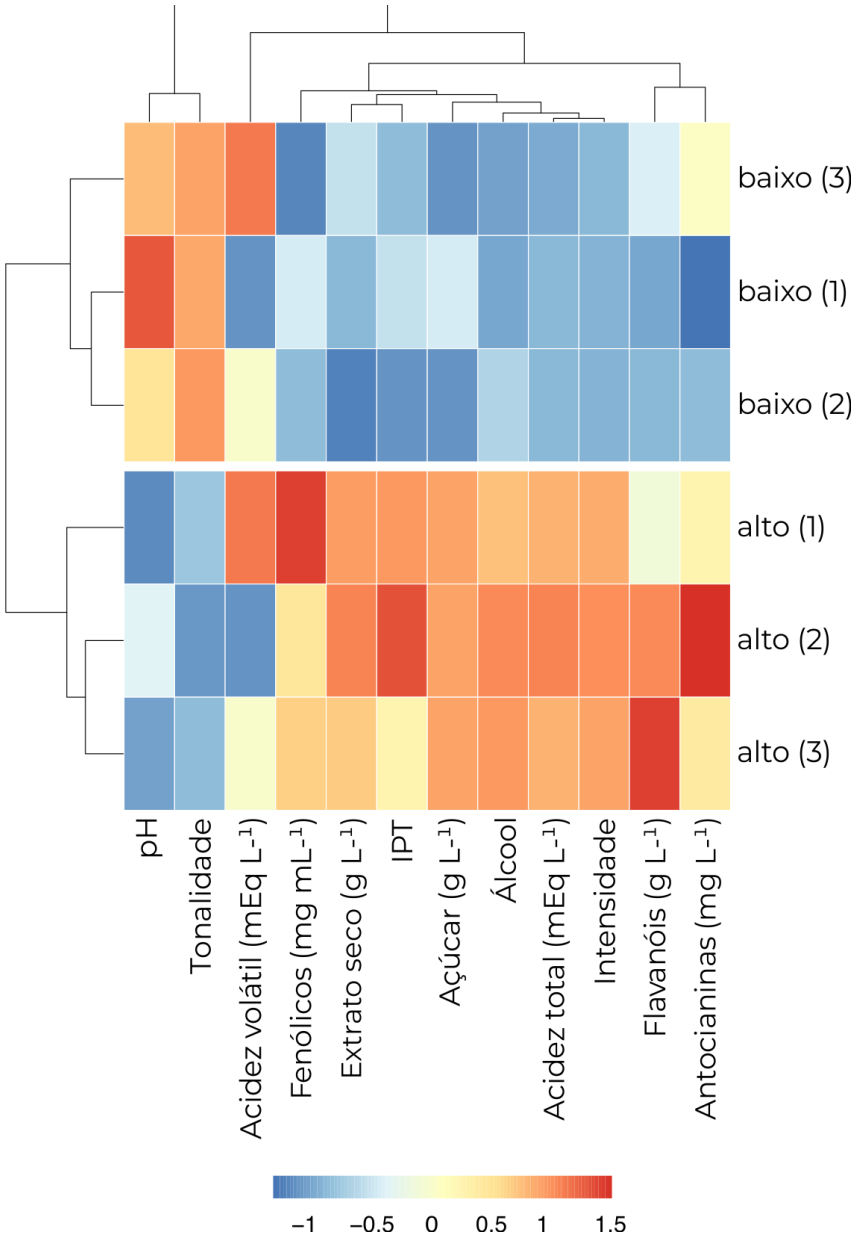


Figura 8. Análise de agrupamentos hierárquicos referente à composição do vinho de colheita de inverno 'Syrah' produzido em 2020, com uvas colhidas separadamente em zonas de alto e baixo valor de CEa.

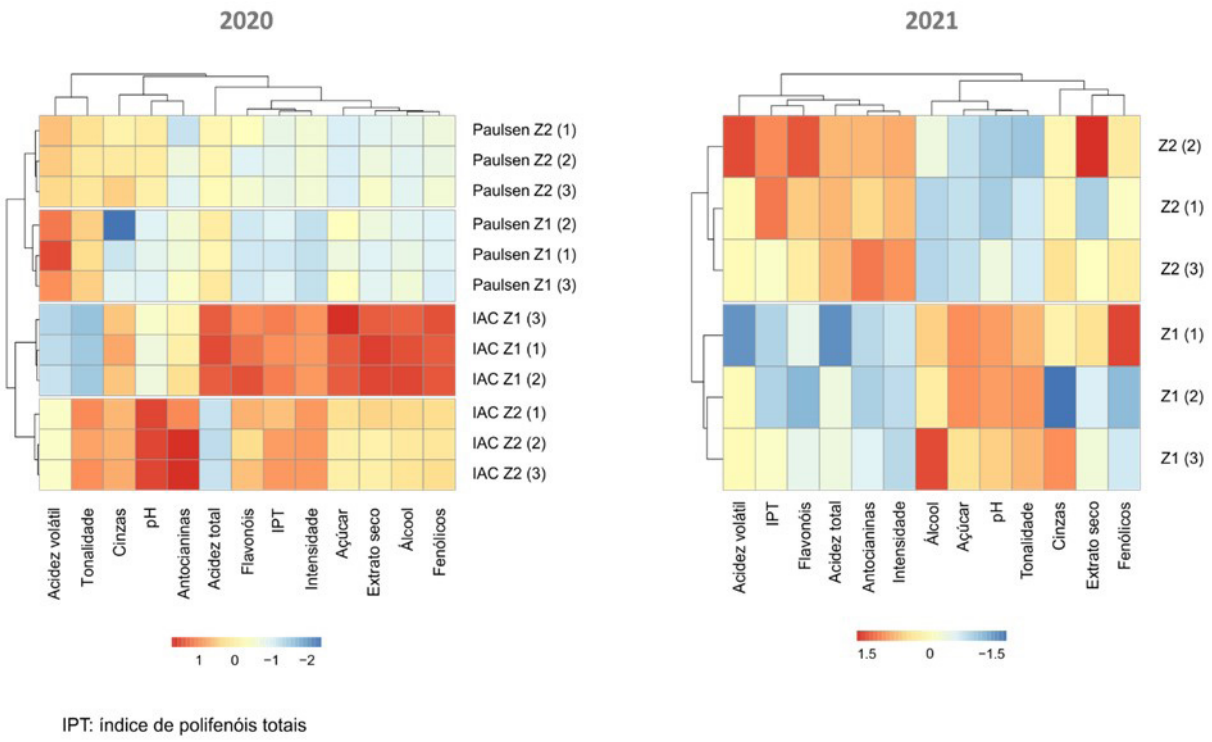


Figura 9. Análise de agrupamentos hierárquicos referente à composição dos vinhos "Syrah" de colheita de inverno, produzidos nos ciclos de 2020 e 2021, conforme a definição de duas zonas de manejo (Z1 e Z2), considerando os diferentes porta-enxertos adotados – "IAC 572" e "Paulsen 1103" (Farinassi, 2022).

sagem por estágio em madeira, enquanto os vinhos da Z2 destacaram-se pelo maior acúmulo de antocianinas. Esses resultados auxiliam no momento da tomada de decisões a quais tratamentos os vinhos devem ser submetidos.

Em 2021, foram avaliadas apenas as zonas de manejo, independente de porta-enxerto, onde a Z2 destacou-se pela maior concentração de antocianinas, importantes para maior estabilidade de cor da bebida.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A delimitação de zonas de manejo em vinhedos com base nos atributos do solo e da planta permite a colheita seletiva de uvas no período de inverno, mesmo em pequenos vinhedos, possibilitando a produção de vinhos com perfis químicos distintos.

AGRADECIMENTOS

Às vinícolas Guaspari (Espírito Santo do Pinhal – SP), Terras Altas (Ribeirão Preto – SP) e Casa Verrone (Itobi – SP), pela disponibilização de seus vinhedos e infraestrutura para a realização de experimentos no modelo *on winery research*. Ao Núcleo Tecnológico EPAMIG Uva e Vinho por realizar as microvinificações e avaliações químicas dos vinhos. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas de estudo, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) processo 2021/07915-0 pelo apoio financeiro à realização do projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

AMARAL, L. R., FIGUEIREDO, G. K. D. A. Geoprocessamento aplicado ao gerenciamento de lavouras. In: QUEIROZ, D. M.; VALENTE, D. S. M.; PINTO, F. A. C.; BÓREM, A. (ed.). **Agricultura digital**. São Paulo: Oficina de Textos, 2022. p. 51-662.

AMMONIACI, M.; KARTSIOTIS, S. P.; PERRIA, R.; STORCHI, P. State of the art of monitoring technologies and data processing for precision viticulture. **Agriculture**, v. 11, n. 3, p. 201, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture11030201.

ARNÓ, J.; MARTINÉZ-CASANOVAS, J. A.; RIBES-DASI, M.; ROSELL, J. R. Review. Precision viticulture. Research topics, challenges and opportunities in site-specific vineyard management. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 7, n. 4, p. 779-790, 2009. DOI: https://doi.org/10.5424/sjar/2009074-1092.

BALAFOUTIS A. T.; KOUNDOURAS, S.; ANASTASIOU, E.; FOUNTAS, S.; ARVANITIS, K. Life cycle assessment of two vineyards after the application of precision viticulture techniques: a case study. **Sustainability**, v. 9, n. 11, p. 1-19, 2017. DOI: https://doi.org/10.3390/su9111997.

BONFANTE, A.; AGRILLO, A.; ALBRIZIO, R.; BASILE, A.; BUONOMO, R.; DE MASCELLIS, R.; GAMBUTI, A.; GIORIO, P.; GUIDA, G.; LANGELLA, G.; MANNA, P.; MINIERI, L.; MOIO, L.; SIANI, T.; TERRIBILE, F. Functional homogeneous zones (fHZs) in viticultural zoning procedure: an Italian case study on Aglianico vine. **Soil**, v. 1, n. 1, p. 427-441, 2015. DOI: https://doi.org/10.5194/soil-1-427-2015.

BRILLANTE, L.; MARTÍNEZ-LÜSCHER, J.; YU, R.; KURTURAL, S. K. Carbon isotope discrimination (δ^{13} C) of grape musts is a reliable tool for zoning and the physiological ground-truthing of sensor maps in precision viticulture. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.561477.

COSTA, B. R. S.; OLDONI, H.; ROCHA JÚNIOR, R.; BASSOI, L. H. Delimitation of homogeneous zones in vineyards using geostatistics and multivariate analysis of different vegetation indices. **Engenharia Agrícola**, v.39, n. Espe, p.13-22, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39nep13-22/2019.

COSTA, B. R. S. **Zonas de vigor vegetativo para colheita seletiva em viticultura irrigada com base em sensoriamento proximal**. 2021. 228 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, Botucatu, 2021.

FARINASSI, L. G. **Influência da variabilidade espacial em vinhedo irrigado na qualidade da uva e do vinho "Syrah" de inverno**. 2022. 133 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, Botucatu, 2022.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing Environment**, v. 80, p. 76-87, 2002.

KEMSAWASD, V.; VIANA, T.; ARDÖ, Y.; ARNEBORG, N. Influence of nitrogen sources on growth and fermentation performance of different wine yeast species during alcoholic fermentation. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 99, p. 10191-10207, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/s00253-015-6835-3.

MARTINEZ-CASASNOVAS, J. A.; AGELET-FERNANDEZ, J.; ARNO, J.; RAMOS, M. C. Analysis of vineyard differential management zones and relation to vine development, grape maturity and quality. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 2, p. 326-337, 2012. DOI: https://doi.org/10.5424/sjar/2012102-370-11.

MATESE, A.; DI GENNARO, S. F. Practical applications of a multisensor UAV platform based on multispectral, thermal and RGB high resolution images in precision viticulture. **Agriculture**, v. 8, n. 7, p. 116, 2018. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture8070116.

OLDONI, H.; COSTA, B. R. S.; BOGNOLA, I.; SOUZA, C. R.; BASSOI, L. H. Homogeneous zones of vegetation index for characterizing variability and site-specific management in vineyards. **Scientia Agricola**, v. 78, n. 4, p. e20190243, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/1678--992X-2019-0243.

OLDONI, H.; COUTINHO, I. D.; ROCHA JUNIOR, R. C.; COLNAGO, L. A.; BASSOI, L. H. Características do vinho de diferentes zonas de manejo determinadas com base no vigor vegetativo da videira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2018, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: AsBraAP, 2018. p. 302-307.

ORTUANI, B.; FACCHI, A.; MAYER, A.; BIANCHI, D.; BIANCHI, A.; BRANCADORO, L. Assessing the effectiveness of variable-rate drip irrigation on water use efficiency in a vineyard in northern Italy. **Water**, v. 11, n. 10, p. 1964, 2019a. DOI: https://doi.org/10.3390/w11101964.

ORTUANI, B.; SONA, G.; RONCHETTI, G.; MAYER, A.; FACCHI, A. Integrating geophysical and multispectral data to delineate homogeneous management zones within a vineyard in Northern Italy. **Sensors**, v. 19, n. 18, p. 3974, 2019b. DOI: https://doi.org/10.3390/s19183974.

PEREIRA, A. J. **Relação entre índices de vegetação e atributos biofísicos do solo e da planta em vinhedo irrigado**. 2022. 134 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, Botucatu, 2022.

PRIORI, S.; MARTINI, E.; ANDRENELLI, M. C.; MAGINI, S.; AGNELI, A. E.; BUCELLI, P.; BIAGI, M.; PELLEGRINI, S.; CONSTANTINI, E. A. C. Improving wine quality through harvest zoning and combined use of remote and soil proximal sensing. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 4, p.1338-1348, 2013. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0376.

RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C; NAIME, J. M.; MOLIN, J. P. Mapeamento da condutividade elétrica do solo – sistema protótipo. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C (ed.). **Agricultura de precisão:** um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 41-45.

REY-CARAMÉS, C.; DIAGO, M. P.; MARTÍN, M. P.; LOBO, A.; TARDAGUILA, J. Using RPAS multi-spectral imagery to characterise vigour, leaf development, yield components and berry composition variability within a vineyard. **Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 14458-14481, 2015. DOI: https://doi.org/10.3390/rs71114458.

TAGARAKIS, A. C.; KOUNDOURAS, S.; FOUNTAS, S.; GEMTOS, T. Evaluation of the use of LIDAR laser scanner to map pruning wood in vineyards and its potential for management zones delineation. **Precision Agriculture**, v. 19, p. 334-347, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s11119-017-9519-4.

TAGARAKIS A.; LIAKOS, V., FOUNTAS, S.; KOUNDOURAS, S.; GEMTOS, T. A.Management zones delineation using fuzzy clustering techniques in grapevines. **Precision Agriculture**, v. 14, p. 18-39, 2013. DOI: https://doi.org/10.1007/s11119-012-9275-4.

TARDAGUILA, J.; DIAGO, M. P.; PRIORI, S.; OLIVEIRA, M. Mapping and managing vineyard homogeneous zones through proximal geoelectrical sensing. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, n. 3, p. 409-418, 2017. DOI: http://doi.org/10.1080/03650340.2017.1359411.

TARDAGUILA, J.; BALUJA, J.; ARPON, L.; BALDA, P.; OLIVEIRA, M. Variations of soil properties affect the vegetative growth and yield components of ''Tempranillo'' grapevine. **Precision Agriculture**, v. 12, p. 762-773, 2011. DOI: https://doi.org/10.1007/s11119-011-9219-4.

TROUGHT, M. C. T.; BRAMLEY, R. G. V. Vineyard variability in Marlborough, New Zealand: characterizing spatial and temporal changes in fruit composition and juice quality in the vineyard. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. 17, n. 1, p.79-89, 2011. DOI: https:// doi.org/10.1111/j.1755-0238.2010.00120.x.

URRETAVIZCAYA, I.; SANTESTEBAN, L. G.; TISSEYRE, B.; GUILLAUME, S.; MIRANDA, C.; ROYO, J. B. Oenological significance of vineyard management zones delineated using early grape sampling. **Precision Agriculture**, v. 15, p. 111-129, 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/s11119-013-9328-3.

YU, R.; BRILLANTE, L.; MARTÍNEZ-LUSCHER, J.; KURTURAL, S. K. Spatial variability of soil and plant water status and their cascading effects on grapevine physiology are linked to berry and wine chemistry. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00790.

62

Viticultura de precisão e enologia de precisão: ferramentas e principais parâmetros para a produção de uvas, elaboração e valorização de vinhos com tipicidades distintas em cada "*terroir*"

Precision viticulture and precision enology: tools and main parameters to produce grapes, winemaking, and promotion of wines with different typicalities in each "terroir"

Giuliano Elias Pereira[1], Henrique Pessoa dos Santos[2], George Wellington Bastos de Melo[3], Luciano Gebler[4], Flávio Bello Fialho[5], Celito Crivellaro Guerra[6], Mauro Celso Zanus[7], Juliane Barreto de Oliveira[8], Thor Vinicius Martins Fajardo[9], Lucas da Ressurreição Garrido[10], Marcos Botton[11] e Rosemary Hoff[12]

[1] *Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, giuliano.pereira@embrapa.br*
[2] *Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, henrique.p.santos@embrapa.br*
[3] *Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, wellington.melo@embrapa.br*
[4] *Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br*
[5] *Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, flavio.bello@embrapa.br*
[6] *Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, celito.guerra@embrapa.br*
[7] *Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, mauro.zanus@embrapa.br*
[8] *Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, juliane.barreto.oliver@gmail.com*
[9] *Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, thor.fajardo@embrapa.br*
[10] *Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, lucas.garrido@embrapa.br*
[11] *Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, marcos.botton@embrapa.br*
[12] *Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, rose.hoff@embrapa.br*

RESUMO

Vinhos são produzidos nas mais diversas regiões do mundo, influenciados por climas e solos como fatores naturais, e pela ação do homem, com técnicas de manejo da videira e vinificação. O conjunto de interações entre os fatores naturais e humanos da viticultura e da enologia formam o "*terroir*". Cada parcela vitícola, em qualquer região do mundo, possui uma especificidade, devendo ser trabalhada e manejada individualmente. Entretanto, existem variações dentro da mesma parcela que são impostas por distintos fatores, tais como manchas e variações na composição físico-química, mineralogia, profundidade e água disponível no solo, além de outras características, como altitude e relevo, posição e orientação do vinhedo, exposição solar, sombreamento, proximidade a matas, dentre outros fatores. Por isso, recomenda-se a adoção da viticultura de precisão e da enologia de precisão, caracterizando-se os contrastes de potencial enológico das uvas para se obter vinhos com tipicidades, estilos e valores agregados distintos. Devido à sua posição geográfica, o Brasil é o único país do mundo com três tipos de viticulturas e produções de vinhos. A primeira é a viticultura para os vinhos tradicionais, no Sul e Sudeste do Brasil, a segunda é a produção de uvas para os vinhos tropicais, no Nordeste, e a terceira, mais recente, é a viticultura para os vinhos de inverno, nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste. Na viticultura de precisão, são considerados diferentes fatores, parâmetros e ferramentas para identificar as zonas homogêneas e heterogêneas nos vinhedos, visando adotar manejos específicos em cada subparcela ou colher as uvas de forma seletiva. Após a colheita, a enologia de precisão busca valorizar o potencial enológico das uvas de cada subparcela, no intuito de elaborar vinhos com diferentes características e tipicidades, entre vinhos jovens, de guarda, rosés, brancos, tintos, dentre outros. O objetivo é classificar e segmentar as uvas de parcelas ou subparcelas contrastantes, elaborando diferentes vinhos. Em áreas com videiras equilibradas em vigor, produtividade controlada e vinificações específicas, pode-

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000035

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

se agregar valor aos vinhos de guarda. Em contrapartida, nas áreas com videiras vigorosas e com maior produtividade, pode-se associar tecnologias de elaboração mais rápida e de baixo custo, obtendo-se vinhos mais jovens e competitivos nos valores de mercado. Este capítulo aborda os principais fatores e ferramentas necessários para a adoção da viticultura de precisão nos vinhedos e da enologia de precisão nas vinícolas. São apresentadas, como base, características vitícolas e enológicas para auxiliar produtores de uva, enólogos e vinícolas nas tomadas de decisão sobre quais ferramentas e parâmetros devem ser utilizados, na segmentação dos vinhedos em subparcelas, na colheita de uvas e na elaboração dos vinhos destas subáreas, valorizando as tipicidades e potenciais de mercado.

Palavras-chave: *Vitis*; uvas; vinhos; potencial enológico; perfil metabólico; avaliação sensorial.

ABSTRACT

Wines are produced in various regions of the world, influenced by climates and soils, as natural factors, and by human action, with management and vinification techniques. The set of interactions between the natural and human factors of viticulture and enology form the "terroir". Each vineyard plot in any region of the world has a specificity, and must be worked and managed individually. However, there are variations within the same plot that are imposed by different factors, such as soil spots and variations in the physical-chemical composition, mineralogy, depth, and available water in the soil, in addition to other characteristics, such as altitude and relief, location and orientation of the vineyard, sun exposure, shading, proximity to woods, among other factors. Therefore, the adoption of precision viticulture and precision enology is recommended, to characterize the contrasts in the enological potential of the grapes, obtaining wines with distinct typicalities, styles and benefits. Due to its geographical position, Brazil is the only country in the world with three types of viticulture and wine production: the first is viticulture for traditional wines, in the South and Southeast of Brazil; the second is the production of grapes for tropical wines in the Northeast; the third, more recent, is viticulture for winter wines, in the Southeast, Central and Northeast regions. Although the natural factors (climate and soil) are restricted to changes, with few corrections and adjustments to the soils, the human factor allows several choices and variations in management. In precision viticulture, several factors, parameters, and tools are considered to identify homogeneous and heterogeneous zones in the vineyards, aiming to adopt specific managements in each sub-plot or to selectively harvest the grapes. After harvest, precision enology seeks to value the enological potential of grapes of each sub-plot, to produce wines with different characteristics and typicalities, young or aged, pinks, whites, reds, among others. The objective is to classify and segment the grapes from contrasting plots or sub-plots in vigor and production, making different wines. In areas with balanced vines in vigor, controlled productivity and specific vinifications, value can be added for premium wines. On the other hand, in areas with vigorous vines and with higher productivity, technologies of faster and lower cost production can be associated, obtaining younger and more competitive wines at market prices. This chapter addresses the main factors and tools needed for adoption of precision viticulture in vineyards and precision enology in wineries. As a basis, viticultural and enological characteristics are presented to assist grape producers, enologists and wineries in decision making on which tools and parameters should be used in the segmentation of vineyards into sub-plots for the harvesting of grapes and for the elaboration of wines from these sub-areas, valuing the characteristics and potential of the market.

Keywords: *Vitis*; grapes; wines; enological potential; metabolic profile; sensorial evaluation.

1 INTRODUÇÃO

Vinhos de "*terroir*" começaram a ser elaborados, primeiramente, nos países do Velho Mundo, principalmente na França (Van Leeuwen et al., 2004; Van Leeuwen; Seguin, 2006; Carbonneau et al., 2015). Atualmente, diversos países vitivinícolas adotam este conceito para valorizar os efeitos dos fatores naturais (clima e solo) e humanos sobre a qualidade, tipicidade e o estilo de vinhos. O fator humano influencia na viticultura, em função do manejo e parâmetros implementados, como clone de variedade, porta-enxerto, sistema de condução, densidade e sentido de plantio, fertilização, irrigação, tipos de poda e condução, número de gemas/produtividade, tratamentos fitossanitários, data de colheita das uvas, dentre outros. Da mesma forma, o homem influencia a tipicidade de vinhos com escolhas e parâmetros enológicos, durante a vinificação, como variações no tempo de maceração, temperaturas de fermentação, tipos de leveduras, insumos enológicos, filtrações, uso de barricas, adoção de *blends*/cortes, dentre outros fatores (Peynaud, 1997; Reynier, 2007).

A valorização do "*terroir*" vai ao encontro do manejo específico e variado a ser adotado dentro de cada parcela vitícola. Em cada vinhedo, os fatores bióticos e abióticos influenciam o desenvolvimento fisiológico das videiras, bem como a composição físico-química e o potencial enológico de uvas, assim como a composição metabólica, as características físico-químicas e sensoriais, que expressam a tipici-

dade e identidade regional dos vinhos (Fiehn, 2002; Keller, 2015; Leeuwen et al., 2022). E essas variações, mesmo que sutis, ocorrem a partir de heterogeneidades intraparcelares, que devem ser identificadas e manejadas diferentemente, de acordo com o objetivo da produção. Este é o conceito da viticultura de precisão, que se integra ao conceito de enologia de precisão (Van Leeuwen et al., 2004; Bramley; Hamilton, 2007; Brillante et al., 2017; Fernández-Novales et al., 2019; Yu et al., 2021). Um vinho comercial de determinado "*terroir*" é obtido a partir de *blends*/cortes de diversos vinhos elaborados a partir de uvas, sejam das diferentes subparcelas de vinhedos, sejam de outras parcelas. A receita e a metodologia são definidas por cada enólogo de cada empresa, cujos detalhes são particulares e únicos.

A viticultura de precisão apresenta diferentes abordagens quando comparada à agricultura de precisão. Na agricultura de precisão, representada e aplicada sobretudo nos cultivos de soja, milho, algodão, trigo, tem como foco identificar as subparcelas homogêneas quanto a um ou mais atributos, realizando manejos específicos para elevar a produtividade e otimizar a rentabilidade da atividade (Amado et al., 2007). Entretanto, na viticultura de precisão, que não tem como foco aumentar a produtividade, a identificação das subparcelas heterogêneas visa à implementação de manejos vitícolas específicos, respeitando os limites de cada subárea e, principalmente, a adoção da enologia de precisão para elaborar vinhos distintos e compatíveis com cada subparcela. Ou seja, são elaborados vinhos jovens ou de guarda, brancos, rosés ou tintos, a partir dos diferentes potenciais enológicos das uvas que são obtidas e identificadas nas subparcelas. É uma estratégia que valoriza o potencial enológico de cada subparcela do vinhedo, evitando um produto médio, se essa estratificação não fosse respeitada, e valorizando o potencial e a tipicidade que pode ser atingida nos vinhos de determinada parcela ou região, com diferentes valores agregados, entre jovens e/ou de guarda, ampliando a gama de produtos e potencializando os valores de mercado.

A partir da implementação das Indicações Geográficas (IG) e Denominação de Origem (DO) para vinhos no Brasil, no início dos anos 2000, observou-se uma melhoria significativa da tipicidade, notoriedade, do reconhecimento e do valor agregado dos produtos brasileiros pelos consumidores (Tonietto et al., 2022). O regulamento das IGs impõe delimitações, envolvendo as condições climáticas, as características pedológicas, as respostas das videiras na região de cultivo, bem como as características físico-químicas e sensoriais das uvas e dos vinhos. Apesar desse avanço, as áreas dos vinhedos da maioria das vinícolas no Brasil ainda não são monitoradas em detalhes, considerando em conjunto os contrastes de solo, mesoclima, microclima e respostas das plantas, características das uvas, para serem subclassificadas em áreas uniformes. Ou seja, na colheita as plantas de cada talhão são consideradas homogêneas, e as uvas com potencial enológico distinto são normalmente agrupadas, gerando produtos com potenciais e tipicidades médias. Portanto, a caracterização e a segregação das variações no espaço e no tempo das condições edafoclimáticas e das respostas das videiras em crescimento, da produção, do potencial enológico das uvas se tornam ferramentas essenciais para a valorização dos diferentes tipos de vinhos a serem elaborados em cada "*terroir*", a partir dos conceitos de vitivinicultura de precisão e enologia de precisão.

A adoção dos conceitos de viticultura de precisão e de enologia de precisão já é uma realidade de impacto nos países do Velho Mundo e de algumas regiões do Novo Mundo vitivinícola (Van Leeuwen et al., 2004; Brillante et al., 2017). Nos estudos realizados em Saint-Emilion (França), o conceito de identificação da variabilidade de solos em uma propriedade, aliado a diferentes variedades implantadas nesses solos, em safras distintas, foi pioneiro na questão do "*terroir*" vitivinícola, que está inteiramente conectado à questão da viticultura de precisão. Nos estudos, os autores mostraram a importância de estudar cada parcela vitícola isoladamente, buscando valorizar o potencial enológico das uvas e dos vinhos, obtidos nessas diferentes condições de solos, das subparcelas (Van Leeuwen et al., 2004; Pereira et al., 2007). Alguns trabalhos pioneiros foram realizados na Serra Gaúcha (RS), confirmando a importância de se identificar a variabilidade dos solos em uma parcela vitícola, influenciando significativamente a composição físico-química de vinhos (Miele et al., 2011; Filippini Alba et al., 2011; Miele et al., 2014; Filippini Alba et al., 2014). Contudo, este conceito ainda é muito preliminar e desconhecido pela grande maioria das vinícolas, nas diferentes regiões vitivinícolas do Brasil. Por isso, neste documento foram reunidas as principais ferramentas e parâmetros que são necessários para a adoção e divulgação desses conceitos, destacando a importância e estimulando as vinícolas do Brasil a avaliar, conhecer e valorizar cada vez mais os vinhos de seus "*terroirs*". Estão expostos temas ligados ao clima, características e manejo dos solos e das plantas, desenvolvimento vegetativo, sanidade e respostas fisiológicas das videiras, datas de colheita, protocolos de vinificação específicos, bem como as características físico-químicas e sensoriais de vinhos. Alguns

trabalhos de identificação de zonas homogêneas e índices de vegetação foram realizados em vinhedos de São Paulo, com a produção de vinhos de inverno, através da técnica da dupla poda (Oldoni et al., 2021; Costa et al., 2019a, 2019b; Costa et al., 2023).

O Brasil é o único país do mundo onde temos três tipos de viticulturas e três tipos de vinhos (Pereira et al., 2020). A primeira e mais antiga, centenária (desde os anos 1875), é a viticultura para a produção de uvas para os vinhos tradicionais, no Sul e Sudeste do Brasil, em climas temperado e subtropical úmido. A segunda, que começou em meados dos anos 1980, é a produção de uvas para os vinhos tropicais, no Nordeste, em clima tropical semiárido. E a terceira, mais recente, tendo iniciado no início dos anos 2000, é a viticultura para a produção de uvas destinadas aos vinhos de inverno, nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste, entre 600 m-1.300 m de altitude, em climas subtropical e tropical de altitude (Pereira et al., 2020; Tonietto et al., 2020).

A cadeia produtiva da uva e seus derivados é de grande importância socioeconômica para o Brasil, comprovados pelos dados apresentados em detalhes por Mello e Machado (2020), relativos a 2019. Trata-se de uma publicação única, pois mostra o Valor Bruto da Produção-VBP do setor vitivinícola brasileiro. A cadeia produtiva vitivinícola brasileira (uvas, vinhos, espumantes, sucos e derivados) movimentou cerca de R$ 11,0 bilhões em 2019, considerando os diferentes canais de distribuição e o enoturismo, enquanto que o segmento de uvas de mesa, para o consumo in natura, movimentou aproximadamente R$ 9,3 bilhões. O país despendeu cerca de R$ 5,50 bilhões com a importação de vinhos e espumantes, nos diversos canais de distribuição incluindo supermercados, lojas especializadas e restaurantes. O setor como um todo, teve um VBP de aproximadamente R$ 26,5 bilhões, em 75.731 hectares de vinhedos (Mello; Machado, 2020).

2 VITICULTURA DE PRECISÃO. PARÂMETROS E FERRAMENTAS UTILIZADAS

2.1 Sensoriamento remoto

Para a adoção da vitivinicultura de precisão, com o objetivo de identificar zonas homogêneas nos vinhedos, diversas ferramentas e tecnologias estão disponíveis, com custos de obtenção variados. Dentre elas, está o sensoriamento remoto, a partir de Sistema de Informações Geográficas (SIG), para análises de variações do relevo e das parcelas vitícolas. A obtenção de imagens pode ser através de satélites, aeronave remotamente tripulada (ARP) e sensores de campo, como medidores da umidade do solo, radiação solar, temperatura máxima e mínima no solo e na zona dos cachos, dentre outras alternativas (Hoff et al., 2017). As informações são obtidas por meio da interpretação de imagens de alta resolução associada ao trabalho de campo, bem como são gerados modelos digitais de elevação e seus derivados de altimetria, declividade e exposição solar em diferentes pontos da parcela vitícola. Os equipamentos usados geram resultados a partir da espectrorradiometria de reflectância e gamaespectrometria terrestre, além de câmeras com sensores térmicos, de infravermelho próximo, que podem identificar diferenças tanto na vegetação dos vinhedos (folhas), quanto na região dos cachos de uvas.

Alguns estudos de sensoriamento remoto foram realizados em vinhedos do Rio Grande do Sul, seja em áreas de indicações geográficas, seja em parcelas de vinhedos, para analisar os aspectos do relevo, principalmente altimetria, declividade e exposição solar, como na Serra Gaúcha, Serra do Sudeste e Campanha (Hoff et al., 2009, 2017). O satélite ALOS tem modelo digital de elevação (MDE) com resolução de 12,5 m, e as imagens podem ser obtidas gratuitamente pelo site Alaska Satellite Facility (ASF), gerado a partir de dados de radar com correção radiométrica de terreno. O MDE pode ser interpolado por krigagem, seguindo as etapas de vetorização em pontos (12,5 m em 12,5 m), a fim de gerar uma imagem de um metro de resolução, visando melhorias na visualização dos vinhedos, não alterando os valores originais da imagem do terreno (Hoff et al., 2017; Junges et al., 2017). Assim, podem ser gerados os parâmetros altimetria de 5 m em 5 metros; classes de declividade 0-3, 3-8, 8-13, 13-20, 20-30, 30-45, >45%; exposição solar nos quatro quadrantes (Norte, Leste, Sul e Oeste), ou em oito quadrantes (Norte, Nordeste, Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste, Oeste e Noroeste). Os trabalhos de viticultura de precisão estão sendo estudados em projeto de pesquisa em execução, em vinícola parceira em Encruzilhada do Sul-RS (Figura 1). Os dados sendo explorados e trabalhados, esperando-se colher uvas e vinificar de zonas diferentes, em função das identificações realizadas por imagens.

A fim de sugerir o monitoramento de áreas críticas, terrenos com as seguintes características devem ser observados: i) declividade plana (0 – 3%), pois podem acumular maior volume de água no solo e gerar problemas para o desenvolvimento das raízes das plantas; ii) declividade maior do que 30%, que é uma condição de maior suscetibilidade à erosão; iii) faces do relevo orientadas para o sul, as quais restringem a exposição solar e podem retardar o amadurecimento das uvas e potencializar doenças, devido à umidade do ar.

Outra ferramenta importante no monitoramento e avaliação de variações intraparcelares de vinhedos é a determinação dos índices de vegetação por imagens orbitais, bem como imagens suborbitais, e mesmo sensores proximais. No Rio Grande do Sul já foram feitos estudos para analisar os aspectos do vigor de planta e condições de água no solo nas regiões vitivinícolas da Serra Gaúcha, Serra do Sudeste e Campanha; Miele et al., 2011; Filippini Alba et al., 2011; Miele et al., 2014; Filippini Alba et al., 2014; Junges et al., 2017; Santos et al., 2022). Os índices de vegetação são comumente utilizados a partir de imagens orbitais, podendo também ser obtidos por aeronaves, ARP e sensores de campo, captando diferentes regiões do espectro eletromagnético, principalmente nas regiões do visível e infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é o mais conhecido, indicando a biomassa fotossinteticamente ativa, podendo inferir sobre o crescimento e a sanidade da vegetação em um vinhedo. O NDVI diferencia a vegetação de outros tipos de cobertura do solo, bem como determina o seu estado de vigor, detectando alterações no processo de crescimento e evidenciando variações entre as plantas ou subparcelas. As imagens do satélite Sentinel-2, com frequência de cinco dias, permitem o mapeamento espacial e temporal/sazonal das variações de crescimento das culturas naturais e plantadas. As imagens são disponibilizadas gratuitamente. Três índices de vegetação foram testados e usados em vinhedos no Rio Grande do Sul para a safra 2021/2022, sendo o índice de vegetação normalizado da água-NDWI, o Soil-Adjusted Vegetativo Index-SAVI e o Índice Red Edge por Diferença Normalizada-NDRE (Figura 2). O NDRE foi mais adequado para a identificação de diferenças em ramos de videiras em São Paulo (Costa et al., 2023).

O sensoriamento remoto também pode ser utilizado para determinar a variação das propriedades dos solos, do estado nutricional do vinhedo, do índice de área foliar, da sanidade das videiras quanto às pragas e doenças, do *status* hídrico das plantas, assim como na previsão da produtividade e do potencial enológico das uvas ao longo das parcelas (Tardaguila et al., 2021; Yu et al., 2021; Ammoniaci et al., 2021; Palacios et al., 2023; Santos et al., 2022).

A viticultura de precisão também pode ser adotada por produtores, sem a necessidade de investimentos elevados, com a implantação de sensores, conforme descrito acima. A simples observação e identificação visual do desenvolvimento vegetativo das plantas no campo, bem como a localização das parcelas de vinhedos, principalmente em regiões declivosas, pode também contribuir com esta identificação de

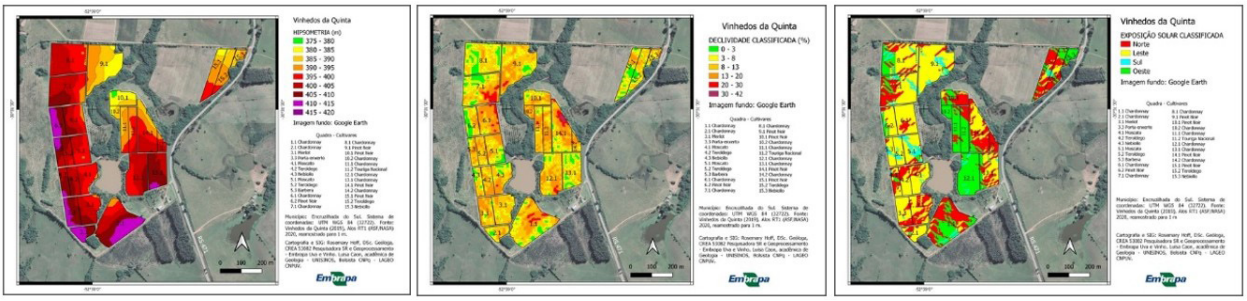


Figura 1. Aspectos do relevo de um vinhedo, na propriedade Vinhedos da Quinta, Encruzilhada do Sul (RS), Brasil: altimetria classificada de 5 m em 5 m (esquerda), declividade classificada (centro) e exposição solar em quatro quadrantes (direita). **Fonte:** Hoff (2021a).

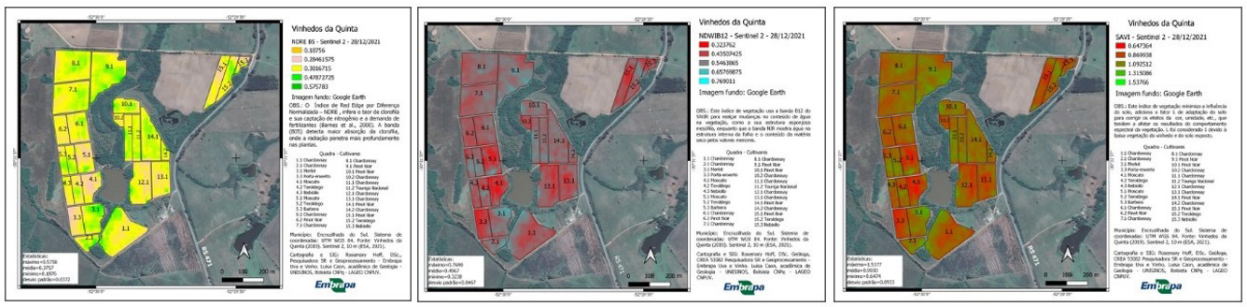


Figura 2. Índices de vegetação a partir de imagem do satélite Sentinel 2, em 28/12/2021, em vinhedos da vinícola Vinhedos da Quinta, em Encruzilhada do Sul (RS), Brasil. Os índices de vegetação são o NDRE banda 5 (esquerda), NDWI banda 12 (centro) e o SAVI (direita). **Fonte:** Hoff (2021b).

subparcelas. O objetivo é identificar zonas heterogêneas, no intuito de realizar colheitas seletivas, das diferentes subparcelas. Por exemplo, caso se identifique uma parte do vinhedo onde as plantas estão menos vigorosas, com folhas amareladas, podem sugerir manchas de solos com carência nutricional, ou mesmo pela presença de rochas no subsolo, que limitam o desenvolvimento radicular das videiras. Outra parte do vinhedo, com vigor mais elevado, deve ser colhida separadamente. Dessa forma, estas áreas devem ser colhidas e vinificadas individualmente, em tanques específicos, de maneira a explorar o potencial enológico distinto das uvas e dos vinhos. Não existe melhor ou pior vinho em razão dessas diferenças observadas em campo, mas existem diferenças quanto ao potencial enológico e ao valor agregado que poderá ser obtido entre a decisão de se elaborar vinhos jovens, com uvas de potencial enológico limitado (baixo teor de sólidos solúveis totais, de compostos fenólicos, elevada acidez, dentre outros parâmetros), até vinhos de guarda, a partir de uvas mais concentradas, em termos de açúcares, compostos fenólicos, compostos voláteis, dentre outros. Esta separação pode acarretar em aumento dos custos de produção, com a necessidade de tanques de fermentação menores, mas esses custos serão recuperados pela valorização dos vinhos mais concentrados, de maior valor agregado.

2.2 Condições climáticas

O clima é um dos principais fatores que compõem o "*terroir*" para a vitivinicultura, influenciando o desenvolvimento, a fisiologia e a sanidade das plantas, assim como o potencial enológico das uvas e a tipicidade dos vinhos, com variações de acordo com as diferentes safras, sejam anuais ou intra-anuais (Van Leeuwen et al., 2004; Pereira et al.; 2006a, 2018; Keller, 2015). Interfere em primeiro lugar na adaptação e na capacidade de produção comercial de variedades, entre americanas, europeias e híbridas, em um determinado local. Os principais fatores do clima são pluviosidade, umidade relativa do ar, temperaturas máximas, médias e mínimas, insolação/radiação solar e velocidade do vento (Reynier, 2007; Van Leeuwen et al., 2004). A variabilidade de climas, inter ou intra-anual, pode ser considerada uma variabilidade temporal que influenciará o potencial enológico das uvas e dos vinhos.

Dentro de uma parcela vitícola, o mesoclima pode apresentar variações, em função do tamanho da parcela, relevo, presença de mata ao redor, incidência dos ventos, incidência solar, dentre outros fatores. Por isso, deve-se fazer um trabalho de levantamento, observação e monitoramento das possíveis desuniformidades em cada parcela, as quais podem contribuir para diferenças significativas no desenvolvimento das videiras, no potencial enológico das uvas e, consequentemente, na tipicidade dos vinhos (Falcão et al., 2010). O mesoclima é um dos fatores que deve ser mais aprofundado e conhecido dentro de uma parcela vitícola, para a aplicação da viticultura de precisão. Já o microclima, no nível da planta e dos cachos, pode ser manipulado/otimizado, pois apresenta diferenças significativas em relação à posição dos ramos e dos cachos, proporcionando impactos nas respostas fisiológicas das videiras, no metabolismo das bagas, no potencial enológico das uvas e na tipicidade dos vinhos (Pereira et al., 2006a; Hunter et al., 2021). De maneira geral, como normalmente a colheita não é realizada de modo seletivo por planta, o microclima deve ser otimizado em cada vinhedo por meio da adequação da poda, do sistema de condução, do espaçamento entre plantas, da orientação da linha de plantio, exposição solar, realização de desfolhas no vinhedo, melhorando a exposição dos cachos (principalmente em sistema de condução em espaldeira), dentre outros parâmetros. Ou seja, a partir do conhecimento das variações meso e microclimáticas intraparcelares, pode-se ajustar o manejo para explorar as variações das uvas, aprimorar e valorizar os produtos obtidos, integrando os conceitos de viticultura de precisão e de enologia de precisão. Alguns trabalhos realizados no Sudeste brasileiro demonstraram a variação intraparcelar, que pode influenciar o desenvolvimento das videiras, bem como o potencial enológico das uvas e dos vinhos (Oldoni et al., 2021; Costa et al. 2019a, 2019b; Costa et al., 2023).

2.3 Características pedológicas

Os solos são considerados o segundo fator componente do "*terroir*" que, juntamente com o clima, podem influenciar de forma muito significativa o desenvolvimento das videiras, as características fisiológicas das plantas, o metabolismo durante a maturação das uvas, chegando à data de colheita com variações importantes em termos de compostos metabólicos essenciais que expressam e contribuem com a tipicidade dos vinhos. A videira é uma planta que se adapta aos mais diversos tipos de solos, desde arenosos, argilosos e mesmo pedregosos (Van Leeuwen et al., 2004; Van Leeuwen; Seguin, 2006). Contudo, não se adapta aos solos rasos, que impossibilitam o desenvolvimento radicular, assim como aos solos alagadiços, que são impróprios e não recomendados para o cultivo comercial de videiras.

Normalmente, os solos são muito variados e desuniformes e se apresentam como mosaicos. No mundo vitícola, na parcela de um hectare, por exemplo,

sempre haverá manchas de solo com contrastes em composição físico-química e mineralógica, variando a profundidade, nutrição, disponibilidade de água, entre outros fatores. Podemos afirmar que sempre haverá condições para se dispor de variabilidade no desenvolvimento das videiras, independentemente do tamanho da parcela vitícola. Portanto, recomenda-se um levantamento do solo para identificar as zonas homogêneas entre parcelas ou subparcelas, visando aos ajustes adequados e possíveis. O manejo diferencial pode ser em relação à fertilização, irrigação, drenagem, tratos culturais, manejo das plantas, no intuito de segmentar as subparcelas para uma colheita diferencial das uvas, pois apresentarão, em função das manchas de solo, características enológicas distintas. Alguns trabalhos foram realizados em vinhedos do Sudeste e Sul do Brasil, comprovando as variações de solos em parcelas vitícolas, que influenciaram o desenvolvimento das videiras, bem como o potencial enológico das uvas e as características físico-químicas dos vinhos (Miele et al., 2011; Filippini Alba et al., 2011, 2014; Miele et al., 2014; Costa et al. 2019a, 2019b; Oldoni et al., 2021; Silva-Sangoi et al., 2022; Santos et al., 2022; Costa et al., 2023). Vale destacar que cada parcela vitícola deve ser analisada quanto às manchas de solos individualmente, pois existe uma grande variação dos solos no Brasil e no mundo.

Além da caracterização e ajuste do solo, recomenda-se também considerar alguns fatores da uva para a definição das subparcelas de plantas que serão agrupadas ou segregadas na colheita, como teor de sólidos solúveis totais, acidez total, pH, compostos fenólicos, dentre outros parâmetros, que serão abordados mais adiante. Desta forma, procura-se colher uvas distintas, bem como elaborar vinhos com diferentes protocolos, com foco em valorização da tipicidade dos produtos, em função do potencial enológico das uvas na colheita (Pereira et al., 2005, 2006b, 2007; Chavarria et al., 2011; Miele et al., 2014).

2.4 Produtividade, vigor de crescimento por planta e por subparcela

Na escala da propriedade, o viticultor deve ter consciência de que existem variações entre plantas e entre subáreas dentro de cada vinhedo. Ou seja, quando se emprega um manejo convencional e uniforme em toda área, normalmente ocorrem variações de rendimento e de potencial enológico das uvas entre plantas do mesmo talhão (Bonilla et al., 2015). Contudo, antes dos avanços da agricultura de precisão, essas variações intrínsecas de cada vinhedo sempre foram tratadas como ruído e, portanto, desprezadas ou ignoradas no mundo vitivinícola (Cooks; Bramley, 1998).

A partir de levantamentos em vinhedos da França (Van Leeuwen et al., 2004; Tisseyre et al., 2008), Espanha (Bonilla et al., 2015), Nova Zelândia (King et al., 2014), Estados Unidos (Sams et al., 2022) e Brasil (Miele et al., 2014; Hoff, 2021a; Santos et al., 2021; Oldoni et al., 2021; Santos et al., 2022; Costa et al., 2023).), percebe-se que essa variabilidade intrínseca e espacial de videiras é comum e pode ocorrer em qualquer região vitivinícola do Brasil e do mundo. A visão tradicional do "*terroir*", que reflete na qualidade e tipicidade do produto, o conjunto do saber fazer e das influências do local de cultivo, é apropriada, mas qual deve ser a escala mais adequada? A escala regional (exemplo, Vale dos Vinhedos)? A escala do vinhedo? A escala de subáreas homogêneas em cada vinhedo? Ou o conjunto delas, obtidas a partir de cortes/misturas/*blends* entre vinhos das diferentes subparcelas? Todas essas questões devem ser avaliadas, pois as variações deverão estar em todos esses diferentes parâmetros, que precisam ser levados em conta e individualmente avaliados.

No desempenho vitivinícola, as variáveis do crescimento vegetativo (vigor) e a produção (kg de uva) por planta tendem a ser mais estáveis entre ciclos quando se analisa o contraste entre áreas ou subáreas. A caracterização da homogeneidade ou heterogeneidade espacial entre videiras ou entre subáreas de vinhedos tem estabelecido associações significativas e consistentes entre os parâmetros de vigor e produção com os parâmetros do solo e do potencial de qualidade enológica da uva (King et al., 2014; Costa et al., 2019a; Santesteban, 2019; Oldoni et al., 2021; Santos et al., 2021, 2022).

Dentre os parâmetros para caracterização de vigor, destaca-se que, em áreas com manejo uniforme de carga de gemas por planta, o diâmetro de tronco (avaliado a 30 cm da superfície do solo) e o peso de poda por planta são variáveis sensíveis e com associação direta com a capacidade de crescimento vegetativo (King et al., 2014). Em geral, quando há excesso de vigor imposto pelo local (nutrição, topografia, disponibilidade hídrica, etc.) ou pela carga restrita de gemas por planta, observa-se uma limitação no potencial enológico dos vinhos (King et al., 2014; Santos et al., 2021). Esse impacto do vigor sobre a qualidade e tipicidade ocorre porque, mesmo adotando podas verdes frequentes para manter as plantas com uma razão foliar adequada (1,5 m^2/kg fruto) e um microclima nos cachos sem sombreamento, as videiras com vigor excessivo não dispõem da mesma capacidade bioquímica para síntese de compostos associados ao potencial enológico das uvas (Keller, 2015; Costa et al. 2019b). Portanto, a carga de gemas por planta, além de exer-

cer um impacto direto na produção por planta, porque afeta o número de ramos produtivos, modula de modo indireto a fisiologia de maturação e o potencial de qualidade enológica da uva nos locais em que o vigor é mais expressivo (Santos et al., 2021). Contudo, apesar da relação direta entre carga de gemas e ramos produtivos, para atingir a produção desejada por planta é necessário que todas as gemas deixadas na poda atinjam a brotação plena. Isso pode variar entre ciclos e locais porque a brotação é influenciada, principalmente, pelo tipo de poda (vara ou esporão) e pela combinação das condições locais de frio e exigência térmicas de cada genótipo (Anzanello et al., 2018).

Diante do exposto, destaca-se que a variabilidade intrínseca dos vinhedos é uma realidade e não se recomenda um manejo uniforme em subáreas que apresentam vigor distinto. Com base na variabilidade de crescimento de plantas, deve-se ajustar uma maior carga de gemas nas plantas mais vigorosas, buscando elevar a produção por planta e controlar o vigor de crescimento dos sarmentos e folhas. Com essa estratégia de equilíbrio entre vigor vegetativo e produção, pode-se garantir um maior fluxo de fotoassimilados para os cachos, em detrimento de ramos e folhas, favorecendo o microclima e estimulando a síntese de compostos que agregam qualidade enológica nas uvas (Keller, 2015; Santos, 2015). A partir dessa estratégia de carga de gemas em função do vigor específico de cada local, pode-se minimizar os contrastes entre plantas de um mesmo vinhedo e explorar o máximo do potencial enológico que cada combinação 'cultivar X local' pode oferecer, fortalecendo a escala de representação do "*terroir*" local.

2.5 Presença de viroses

A presença de viroses em vinhedos, muito comum e que afeta todos os países, também é um parâmetro para ser levado em conta dentro do conceito de viticultura de precisão e de enologia de precisão. Após o plantio de um vinhedo, mesmo partindo-se de materiais isentos de viroses, com certificado de sanidade, reinfecções por vírus acontecem em vinhedos do mundo todo. Por isso, em muitas situações, é preciso conviver com os problemas de viroses em vinhedos. Atualmente são conhecidos cerca de 86 patógenos virais associados à videira no mundo (Fuchs, 2020), os quais constituem importante ameaça à vitivinicultura. Estas viroses causam expressivos impactos negativos no desempenho das videiras, reduzindo o crescimento da planta, a produção e o potencial enológico das uvas (Naidu et al., 2015; Pereira et al., 2021). A definição de zonas homogêneas de atributos da planta (ex.: uvas colhidas de plantas com ou sem viroses) para um manejo diferenciado do vinhedo (ex.: colheita e processamento seletivos), constituiria zonas de manejo (subparcelas homogêneas em relação à variável considerada, por ex., virose). Isto poderia subsidiar o responsável pela tomada de decisão ou o assessor técnico para a elaboração de lotes específicos, visando à obtenção de produtos (vinhos e derivados) com qualidades distintas e diferentes valores de mercado.

Em 2021, foi realizado um monitoramento em campo de plantas com ou sem viroses como ferramenta exploratória para adotar a viticultura, aliada à enologia, de precisão. Videiras selecionadas em vinhedos na Serra Gaúcha, com base na manifestação, ou não, de sintomas de viroses na copa das plantas, foram indexadas com o teste RT-PCR em tempo real (RT-qPCR) (Dubiela et al., 2013) para três dos principais vírus da cultura, grapevine leafroll-associated virus 3 (GLRaV-3), grapevine virus A (GVA) e grapevine virus B (GVB), agentes causais das viroses do enrolamento da folha e do lenho rugoso. Isto foi realizado para comprovar a infecção viral em plantas sintomáticas (30 plantas/vinhedo) ou a ausência desses vírus em plantas assintomáticas (40 plantas/vinhedo), em três vinhedos comerciais (Bento Gonçalves, RS e Pinto Bandeira, RS) da cv. Cabernet Sauvignon com 16 a 23 anos de plantio, totalizando-se 210 plantas indexadas. Foram observadas incidências de 24,3-38,6% (GLRaV-3), 7,1-30% (GVA) e 12,8-45,7% (GVB). Cerca da metade das plantas avaliadas (50,5%) estavam sadias (para os três vírus) e, em relação ao tipo de infecção, foram observadas 27,6%, 17,1% e 4,8% de plantas infectadas com um, dois ou três vírus, respectivamente (Fajardo et al., 2021; Fajardo et al., 2024). Ao final dessa etapa, foram selecionadas, para a colheita das uvas, apenas plantas sintomáticas, com infecção comprovada, com ao menos um vírus, no teste diagnóstico, e plantas assintomáticas, sem infecção viral comprovada. A composição físico-química das uvas e dos vinhos, obtidos a partir dos ensaios com e sem viroses, apresentou diferenças significativas (dados não mostrados). A presença de virose comprometeu a maturação das uvas, reduzindo o potencial enológico das uvas, bem como a tipicidade dos vinhos. Estes resultados comprovam a importância da identificação da presença de viroses em vinhedos, bem como realizar colheitas seletivas para a elaboração de diferentes vinhos.

Vários estudos comparativos entre videiras infectadas por vírus e sadias, ou entre plantas sintomáticas e assintomáticas, foram conduzidos e, na maioria dos casos, houve diferenças em favor das plantas sadias, quando se consideram variáveis agronômicas e enológicas (Zanus et al., 1993; Mannini; Digiaro, 2017;

Girardello et al., 2020; Pereira et al., 2021). Os principais prejuízos causados pelas viroses estão relacionados à queda acentuada da produção, decréscimo no rendimento, número de cachos/planta e peso de bagas, atraso na maturação das uvas, diminuição do teor de açúcares, menor concentração de compostos fenólicos em uvas tintas, diminuições da longevidade, do vigor e do crescimento vegetativo, podendo levar à morte de plantas. Como consequência, uvas produzidas por plantas infectadas podem resultar na elaboração de produtos enológicos (vinhos) de menor valor agregado, justificando-se a adoção da enologia de precisão. Normalmente, uvas de videiras com viroses são indicadas para a elaboração de vinhos jovens (Pereira et al., 2021). De modo geral, as viroses também podem afetar alguns compostos aromáticos da videira, o que compromete diretamente a sua tipicidade (Girardello et al., 2019). Os efeitos da virose sobre o desempenho agronômico da videira são dependentes da cultivar, do tempo de infecção viral, da virulência do patógeno e das condições ambientais. No campo, a planta infectada por vírus permanecerá doente e é irrecuperável. O único controle eficiente de doenças causadas por vírus, perpetuados e acumulados em materiais propagativos como estacas e transmitidos pela enxertia, é o uso de plantas livres de vírus na formação de um novo vinhedo (Fajardo; Nickel, 2019). Alguns trabalhos demonstraram que o uso de ferramentas de imagens e sensoriamento remoto pode ser usado como alternativa para detectar plantas infectadas por viroses, num contexto de viticultura de precisão (MacDonald et al., 2016; Bendel et al., 2020; Junges et al., 2020). Assim, em vinhedos infectados, a adoção da viticultura de precisão possibilitará separar as subparcelas, para elaboração de vinhos jovens e de guarda, a partir de plantas sintomáticas ou assintomáticas, respectivamente. Portanto, a identificação da presença de viroses em vinhedos alia a viticultura de precisão com a necessidade de adoção da enologia de precisão.

2.6 Pragas e doenças fúngicas

A sanidade das videiras, mediante o controle de pragas e doenças fúngicas, é de suma importância para garantir o desenvolvimento adequado, nível de maturação e produção de uvas sadias para a obtenção de vinhos com elevada tipicidade e sem resíduos de produtos. O conceito de viticultura de precisão também leva em conta o modelo de distribuição das pragas e doenças fúngicas no vinhedo, o seu monitoramento ao longo do tempo, a detecção precoce de infecções e o consequente controle racional (Embrapa Uva e Vinho, 2021; Pithan et al., 2019, 2021). Além disso, os danos provocados por pragas e doenças em um vinhedo podem ocorrer de modo generalizado em toda área, ou podem ser localizados. Em ambos os casos, é realizada uma seleção de cachos no momento da colheita, e os cachos afetados por pragas e/ou doenças são descartados. Deve ser adotado o mesmo conceito de separação de uvas, conforme descrito acima, para as doenças virais.

Como exemplo de praga que compromete o potencial enológico das uvas e dos vinhos, está a traça-dos-cachos (*Criptoblabes gnidiella*), causada por uma mariposa que coloca os ovos no interior dos cachos ainda em formação, cujas larvas que eclodem causam enormes danos vitícolas e enológicos (Botton et al., 2013). Em relação às doenças, podemos citar o míldio (*Plasmopara viticola*), o oídio (*Uncinula necator*), a antracnose (*Elsinoë ampelina)*, escoriose (*Phomopsis vitícola*), a podridão-da-uva-madura (*Glomerella cingulata*), a podridão-cinzenta (*Botrytis cinerea*), a podridão-amarga (*Greeneria uvicola*), a podridão-ácida (complexo de fungos e bactérias), a podridão-descendente (*Botryosphaeria* spp. e *Eutypa lata*) , declínio da videira, dentre outras (Garrido; Gava, 2014). Estas doenças, em função da sua intensidade e momento da ocorrência, também podem comprometer toda a safra, em termos de produtividade e potencial enológico das uvas e dos vinhos, além outros problemas como o declínio e morte de plantas, causadas por nematoides e fungos de solo. Estudos mostraram que abordagens espectrais poderiam ser úteis para promover análises quantitativas e qualitativas da distribuição espaço-temporal de videiras afetadas por pragas e doenças, em um contexto de viticultura de precisão, ou mesmo o monitoramento de doenças e mapas do vinhedo, através de sensores remotos (Junges et al., 2020). Por isso, é imprescindível o conhecimento do histórico dos problemas fitossanitários do vinhedo e o seu manejo integrado como ferramentas dentro da viticultura de precisão.

3 ENOLOGIA DE PRECISÃO. PARÂMETROS E FERRAMENTAS UTILIZADAS

3.1 Composição metabólica das uvas. Composição físico-química e sensorial dos vinhos

A enologia de precisão está integrada à viticultura de precisão, cujos conceitos se complementam e buscam identificar as semelhanças e diferenças encontradas em uma parcela vitícola, no intuito de elaborar vinhos que possam expressar o seu potencial, de acordo com as variações dentro do mesmo "*terroir*". A adoção da enologia de precisão leva a ajustes

finos, adotados em determinados processos ou protocolos de vinificação, em decorrência das variabilidades das uvas encontradas no campo, no momento da colheita. A partir das variações identificadas nas parcelas, são inúmeros os parâmetros enológicos utilizados para a tomada de decisão da data de colheita, bem como sobre quais tipos de vinhos elaborar, com distintos protocolos de vinificação. Dentre eles, podemos citar a determinação da composição físico-química das uvas, como os sólidos solúveis totais (ºBrix), a acidez total titulável, o pH, bem como outras análises, destrutivas ou não destrutivas, que permitem determinar os compostos fenólicos ou outros compostos metabólicos de suma importância enológica, presentes nos diferentes tecidos das uvas (Fiehn, 2002; Ammoniaci et al., 2021; Fredes et al., 2021). O estudo do metaboloma em uvas permite conhecer e descrever o conjunto das medidas quantitativas dos metabólitos, relativas às respostas multiparamétricas dinâmicas das plantas (metabolismo das videiras), influenciadas pelos estímulos ambientais ou modificações genéticas (Holmes et al., 2019).

Da mesma forma que o fator humano influencia as características das uvas em campo, compondo o "*terroir*" juntamente com os fatores clima e solo, as tomadas de decisão ainda em campo, como a data de colheita das uvas, bem como na vinícola, durante a vinificação, tornam o papel do homem essencial para a valorização dos produtos comerciais. A enologia de precisão busca extrair seletivamente, ao máximo, as potencialidades das uvas para elaborar vinhos a partir das subparcelas identificadas, buscando distinguir e valorizar os produtos, de acordo com o potencial mercadológico de cada lote de uvas das subparcelas.

Com o sensoriamento remoto também é possível elaborar mapas com as variáveis enológicas. Na Espanha, Fernández-Novales et al. (2019) demonstraram ao longo da evolução da maturação da uva o contraste intraparcelas quanto aos valores de sólidos solúveis totais (ºBrix), antocianinas e fenólicos totais (Figura 3).

Nos mapas, pode-se identificar que, onde os valores de ºBrix são superiores, também são maiores os níveis de antocianinas e fenólicos totais. Dessa forma, seguindo uma colheita seletiva, pode-se elaborar vinhos com maior tempo de maceração das cascas e das sementes com as uvas dessas zonas com maior grau de maturação, bem como utilizar barri-

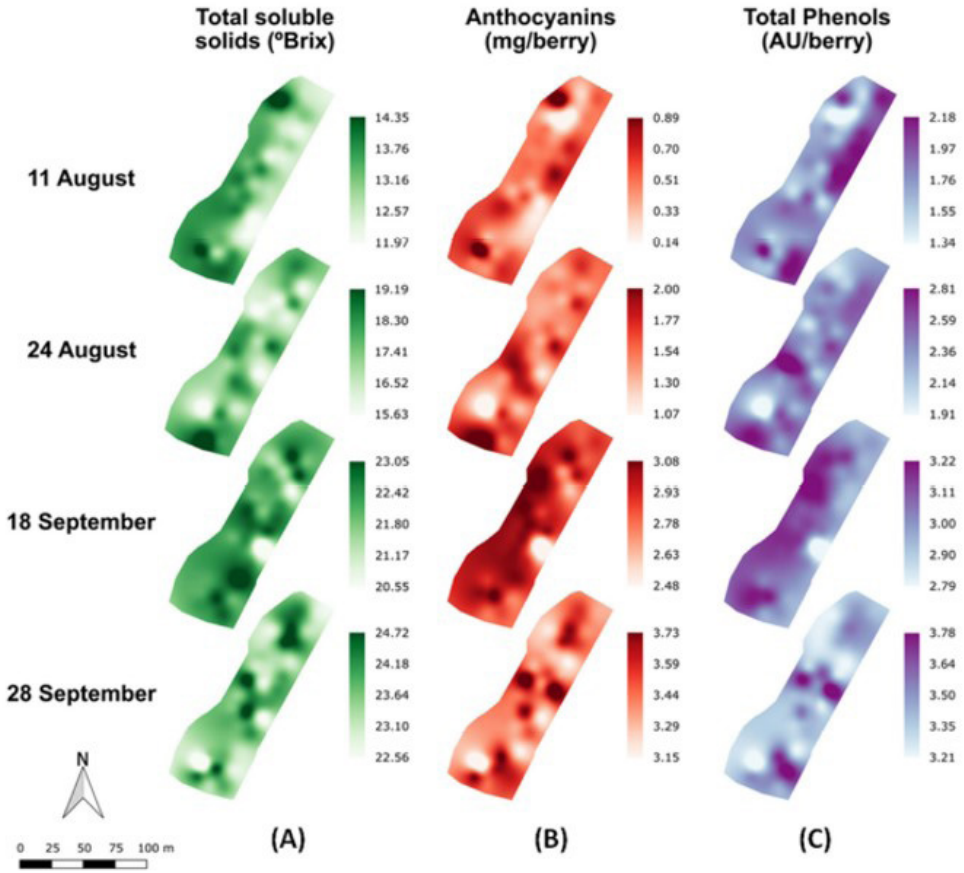


Figura 3. Mapas preditivos da variação espacial dos sólidos solúveis totais (A), antocianinas (B) e fenólicos totais (C) durante a maturação de uvas Tempranillo em La Rioja, Espanha, entre 11/08 e 28/09/2017. **Fonte:** Fernández-Novales et al. (2019).

cas de carvalho para vinhos de guarda. Por outro lado, nas uvas das zonas mais claras dos mapas (menor ºBrix, antocianinas e fenólicos totais), sugere-se a elaboração de vinhos jovens, com pouco tempo de maceração, sem uso de carvalho, por exemplo. Nas uvas colhidas das zonas intermediárias, em maturação, pode-se elaborar outros tipos de vinhos, com diferentes protocolos de vinificação. Ou seja, o conceito de enologia de precisão segue exatamente essa adequação do processamento em função do nível de maturação/potencial enológico da uva que pode ser obtido em cada subparcela do vinhedo.

Diversos trabalhos científicos foram publicados mostrando resultados com a variabilidade do potencial enológico das uvas e, consequentemente, dos vinhos, em função das subparcelas em vinhedos. Os parâmetros que comprovam a variabilidade vão desde o pH, ºBrix e acidez das uvas (Ammoniaci et al., 2021; Fredes et al., 2021), passando pela produtividade e tamanho dos cachos (Brillante et al., 2017; Bramley et al., 2020), composição físico-química e compostos fenólicos, tais como antocianinas, flavonóis, procianidinas e fenólicos totais, bem como aminoácidos (Miele et al., 2014; Fernández-Novales et al., 2019; Jasse et al., 2021; Yu et al., 2021). Por outro lado, são escassos os trabalhos de pesquisas desenvolvidos para mostrar também a variabilidade dos compostos aromáticos nas subparcelas, mesmo estes sendo de suma importância para a expressão da tipicidade dos vinhos de "*terroir*" (Miele et al., 2014; Scarlett et al., 2014; Alessandrini et al., 2017; Van Leeuwen et al., 2022).

Outros parâmetros podem ser usados para caracterizar a variabilidade enológica intraparcelar quanto à composição físico-química e sensorial dos vinhos. Esses descritores estão associados com a complexa interação entre fatores naturais (clima e solo), humanos e genéticos, de cada variedade, em um determinado "*terroir*" e, portanto, podem confirmar as variações de compostos do metabolismo primário e secundário da videira (Falcão et al., 2010; Miele et al., 2014; Herderich et al., 2015; Van Leeuwen et al., 2022).

Um fato importante a ser levado em conta é a amostragem por parcela e subparcela vitícola para definição da variabilidade de maturação e definição do ponto de colheita. O número amostrado de bagas deve levar em conta o número de plantas por subparcela. O número mínimo recomendado é de 20 plantas amostradas por hectare, que pode ser proporcional à área, como 0,25. Combinando os dois fatores, o número de plantas amostradas pode ser obtido pela fórmula $N = 20\ A^{0.25}$, em que A é a área em hectares. Portanto, com base nessa fórmula, deve-se amostrar bagas de 11 videiras em 0,1 ha ou 36 videiras em 10 ha.

A partir das variações intraparcelares obtidas com as amostragens, definem-se as particularidades que devem ser trabalhadas/manejadas, tanto em termos vitícolas quanto enológicos. Isso reforça a ideia de que os conceitos de viticultura de precisão e de enologia de precisão são integrados e indissociáveis. E cada parcela vitícola, cada vinhedo, em qualquer lugar do Brasil ou do mundo, apresentará variações específicas e únicas, que devem ser estudadas, identificadas e trabalhadas de formas distintas.

A enologia de precisão tem por objetivo eleger as práticas, processos e protocolos de vinificação, como extração e preparo do mosto, temperaturas das fermentações (alcoólica e malolática), estabilização e envelhecimento, mais sintonizadas com a composição das uvas e com os objetivos que se deseja alcançar no produto final. Nesse sentido, para colocar em prática uma enologia de precisão, é preciso dispor de tanques e vasilhames menores, para as fermentações e guarda dos vinhos, que permitam a separação de lotes homogêneos das diferentes subparcelas. Na maioria das vinícolas brasileiras, ainda é comum, por essa inadequação, misturar mostos e vinhos das diferentes subparcelas em tanques maiores, reduzindo dessa forma a qualidade e a tipicidade como um todo após a mistura. Conforme dito anteriormente, esta separação de diferentes lotes das subparcelas pode elevar os custos, pela necessidade de tanques menores. Mas os valores comerciais dos produtos obtidos para venda compensarão os investimentos iniciais. Além disso, a precisão das práticas de elaboração com as especificidades de composição das uvas também é fundamental. Assim, por exemplo, os níveis de SO_2 a serem adicionados devem observar rigorosamente as variações do pH do mosto, e não ser estabelecidos de forma geral para as categorias dos vinhos. Os processos de maceração, antes de seguir rigorosos protocolos-padrão, devem observar as diferenças de composição das uvas (em maturação, riqueza de compostos e sanidade) determinadas e variáveis pelo efeito safra. Outro exemplo de prática importante de enologia de precisão é o corte (*blend*) de vinhos-base para a elaboração de espumantes, para adequar ao processo de tomada de espuma (Charmat ou método tradicional) e à constância do estilo desejado, em cor, aroma e sabor. Os cortes também são usados em vinhos brancos e tintos tranquilos. Para valorizar a tipicidade dos vinhos, vinculada ao efeito "*terroir*", o enólogo pode eleger práticas enológicas de menor intervenção, por exemplo, a fermentação com leveduras indígenas, ou ausência de adição de SO_2, muito usado atualmente com os vinhos chamados "naturais", com mínimas intervenções enológicas. Mas, nesses

casos, os riscos de contaminação e evolução precoces são elevados, devendo-se atentar muito para a higiene do processo. Outros parâmetros usados por enólogos são extração de cor e compostos fenólicos com maceração clássica, bem como evitar o uso excessivo de insumos, clarificantes e estabilizantes e filtração. Em suma, no mundo do vinho, uma ampla diversidade de tipos e estilos de produtos podem ser alcançados.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adoção da viticultura de precisão e da enologia de precisão pode contribuir para uma melhoria do potencial enológico das uvas, bem como para a qualidade e tipicidade dos vinhos de um "*terroir*" ou de uma região. Da mesma forma, poderá incrementar a rentabilidade das vinícolas, através do manejo vitícola específico nas parcelas, bem como da adoção de práticas enológicas seletivas e individuais, de acordo com os lotes de uvas, no sentido de valorizar os diferentes produtos com distintos potenciais mercadológicos e valores agregados, buscando agradar diferentes perfis de consumidores, em termos de paladar e de valor de mercado.

REFERÊNCIAS

ALESSANDRINI, M.; GAIOTTI, F.; BELFIORE, N.; MATARESE, F.; D'ONOFRIO, C.; TOMASI, D. Influence of vineyard altitude on Glera grape ripening (Vitis vinifera L.): effects on aroma evolution and wine sensory profile. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 97, n. 9, p. 2695-2705, 2017. DOI: http://doi.org/10.1002/jsfa.8093.

AMADO, T. J. C.; PONTELLI, C. B.; SANTI, A. L.; VIANA, J. H. M.; SULZBACH, L. A. S. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** v. 42, n. 8, p. 1101-1110, 2007. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000800006.

AMMONIACI, M.; KARTSIOTIS, S.; PERRIA, R.; STORCHI, P. State of the art of monitoring technologies and data processing for precision viticulture. **Agriculture**, v. 11, n. 3, p. 201, 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/agriculture11030201.

ANZANELLO, R.; FIALHO, F. B.; SANTOS, H. P. Chilling requirements and dormancy evolution in grapevine buds. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 4, p. 364-371, 2018. DOI: http://doi.org/10.1590/1413-70542018424014618.

BENDEL, N.; KICHERER, A.; BACKHAUS, A.; KÖCKERLING, J.; MAIXNER, M.; BLESER, E.; KLÜCK, H.-C.; SEIFFERT, U.; VOEGELE, R. T.; TÖPFER, R. Detection of Grapevine Leafroll-Associated virus 1 and 3 in white and red grapevine cultivars using hyperspectral imaging. **Remote Sensing**, 2020, 12, 1693. https://doi.org/10.3390/rs12101693.

BONILLA, I; TODA, F. M.; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J. A. Vine vigor, yield and grape quality assessment by airborne remote sensing over three years: analysis of unexpected relationships in cv. Tempranillo. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 13 n. 2, p. e0903, 2015. DOI: http://doi.org/10.5424/sjar/2015132-7809.

BOTTON, M.; OLIVEIRA, J. E. de M.; RINGENBER, R.; CARVALHO, A. N. M.; FERNANDES, M. H. A. **Biologia, monitoramento e controle da Traça-dos-cachos da videira**. Bento Gonçalves: Embrapa, 2013. (Circular Técnica 99).

BRAMLEY, R. G., OUZMAN, J., TROUGHT, M. C. Making sense of a sense of place: precision viticulture approaches to the analysis of terroir at different scales. **OENO One**, v. 54, n. 4, p. 903-917, 2020. DOI: http://doi.org/10.20870/oeno-one.2020.54.4.3858.

BRAMLEY, R.G.V.; HAMILTON R.P. Terroir and precision viticulture: are they compatible? **Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin**, v. 41, n. 1, p. 1-8. 2007. DOI: http://doi.org/10.20870/oeno-one.2007.41.1.855.

BRILLANTE, L., MARTÍNEZ-LUSCHER, J., YU, R., PLANK, C. M., SANCHEZ, L., BATES, T. L., BRENNEMAN, C., OBERHOLSTER, A., KURTURAL, S. Assessing spatial variability of grape skin flavonoids at the vineyard scale based on plant water status mapping. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, p. 5255-5265, 2017. DOI: http://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b01749.

CARBONNEAU, A.; DELOIRE, A.; TORREGROSA, L.; JAILLARD, B.; PELLEGRINO, A.; MÉTAY, A.; OJEDA, H.; LEBON, E.; ABBAL, P. **Traité de la Vigne:** Physiologie, Terroir, Culture. 2. éd. Paris: Dunod, 2015. 592 p.

CHAVARRIA, G.; BERGAMASCHI, H.; SILVA, L. C.; SANTOS, H. P.; MANDELLI, F.; GUERRA, C. C.; FLORES, C. A.; TONIETTO, J. Relações hídricas, rendimento e compostos fenólicos de uvas Cabernet Sauvignon em três tipos de solo. **Bragantia**, v. 70, p. 481-487, 2011. DOI: http://doi.org/10.1590/S0006-87052011005000004.

COOKS, E.; BRAMLEY, R. G. V. Precision agriculture: opportunities, benefits and pitfalls. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 38, n. 7, pp. 753-763, 1998. DOI: http://doi.org/10.1071/EA97156

COSTA, B. R. S.; OLDONI, H.; SILVA, T. M. M.; FARINASSI, L. G.; BOGNOLA, I. A.; BASSOI, L. H. How similar is the zoning of diferente vegetation índices: defining the optimal framework for monitoring grapevines' growth within vigorous vineyards. **Scientia Horticulturae**, v. 322, p. 112404, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112404

COSTA, B. R. S., OLDONI, H., ROCHA JUNIOR, R., BASSOI, L. H. Delimitation of homogeneous zones in vineyards using geostatistics and multivariate analysis of different vegetation indices. **Engenharia Agrícola**, v. 39, pp. 13-22, 2019a. DOI: http://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39nep13-22/2019.

COSTA, B. R. S., OLDONI, H., SILVA, W. A., MARTINS, R. L., BASSOI, L. H. Temporal variation and spatial distribution of relative indices of leaf chlorophyll in grapevine cv. Chardonnay. **Engenharia Agrícola**, v. 39, pp. 74-84, 2019b. DOI: http://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39nep74-84/2019.

DUBIELA, C. R.; FAJARDO, T. V. M.; SOUTO, E. R.; NICKEL, O.; EIRAS, M.; REVERS, L. F. Simultaneous detection of Brazilian isolates of grapevine viroses by TaqMan real-time RT-PCR. **Tropical Plant Pathology**, v. 38, p. 158-165, 2013. DOI: http://doi.org/10.1590/S1982-56762013000200011.

EMBRAPA UVA E VINHO. **Crops monitoramento de doenças: uma nova ferramenta para o manejo de míldio na cultura da videira**. Bento Gonçalves, 2021.

FAJARDO, T. V. M.; DA RÉ, I.; PEREIRA, G. E.; DE OLIVEIRA, J. B.; NICKEL, O. Relationship between symptom expression and viral infection in grapevines cv. Cabernet Sauvignon. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FITOPATOLOGIA, 52., 2021. **Anais** [...]. Brasília, DF: SBF, 2021. p. 195.

FAJARDO, T. V. M.; NICKEL, O. **Transmissão de vírus e controle de viroses em plantas**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2019. 25 p. (Embrapa Uva e Vinho, Documentos 110).

FAJARDO, T. V. M.; PEREIRA, G. E.; NICKEL, O. **Incidência e prevalência de vírus relacionadas à sintomatologia em videiras 'Cabernet Sauvignon'.** 2024. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 27.

FALCÃO, L. D.; BURIN, V. M.; CHAVES, E. S.; VIEIRA, H. J. ; BRIGHENTI, E.; ROSIER, J.; BORDIGNON-LUIZ, M. T. Vineyard altitude and mesoclimate influences on the phenology and maturation of Cabernet-Sauvignon grapes from Santa Catarina state. **Journal International des Sciences de la Vigne et Du Vin**, v. 44, n. 3, p. 135-150, 2010. DOI: http://doi.org/10.20870/oeno-one.2010.44.3.1470.

FERNÁNDEZ-NOVALES, J.; TARDÁGUILA, J.; GUTIÉRREZ, S.; DIAGO, M. P. On-The-Go VIS + SW - NIR spectroscopy as a reliable monitoring tool for grape composition within the vineyard. **Molecules**, v. 24, p. 2795, 2019. DOI: http://doi.org/10.3390/molecules24152795.

FIEHN, O. Metabolomics-the link between genotypes and phenotypes. **Plant Molecular Biology**, v. 48, p. 155–171, 2002. DOI: http://doi.org/10.1023/A:1013713905833.

FILIPPINI ALBA, J. M.; FLORES, C. A.; MIELE, A.; VILLANI, L. M. SIG para a gestão vitivinícola no Vale dos Vinhedos, RS. In: BERNARDI, A, V, C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (eds.). **Agricultura de precisão:** resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 368-373.

FILIPPINI ALBA, J. M.; MIELE, A.; FLORES, C. A.; PAVAN, C.; FOCHESATO, M. L.; LEVIEN, H. F.; ZARNOTT, D. H. Viabilidade espacial dos atributos físicos e químicos de solo e planta na UP Uva para Vinho, Bento Gonçalves, RS. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (eds.). **Agricultura de precisão:** um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 277-281.

FREDES, S. N.; RUIZ, L. A.; RECIO, J. A. Modeling ºbrix and ph in wine grapes from satellite images in Colchagua Valley, Chile. **Agriculture**, v. 11, n. 8, p. 697, 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/agriculture11080697.

FUCHS, M. Grapevine viruses: a multitude of diverse species with simple but overall poorly adopted management solutions in the vineyard. **Journal of Plant Pathology**, v. 102, p. 643-653, 2020. DOI: http://doi.org/10.1007/s42161-020-00579-2.

GARRIDO, L. da R.; GAVA, R. **Manual de doenças fúngicas da videira.** Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2014, 101 p.

GIRARDELLO, R. C.; COOPER, M. L.; LERNO, L. A.; BRENNEMAN, C.; ERIDON, S.; SOKOLOWSKY, M.; OBERHOLSTER, A. Impact of grapevine red blotch disease on Cabernet Sauvignon and Merlot wine composition and sensory attributes. **Molecules**, v. 25, p. 3299, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/molecules25143299

GIRARDELLO, R. C.; COOPER, M. L.; SMITH, R. J.; LERNO, L.; BRUCE, R. C.; ERIDON, S.; OBERHOLSTER, A. Impact of Grapevine Red Blotch disease on grape composition of Vitis vinifera Cabernet Sauvignon, Merlot and Chardonnay. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 67, p. 5496-5511, 2019. DOI: http://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b01125.

HERDERICH, M.; BARTER, S.; BLACK, C. A.; BRAMLEY, R.; CAPONE, D.; DRY, P.; SIEBERT, T.; ZHANG, P. Terroir effects on grape and wine aroma compounds. In: EBELER, S. E. (ed.). **Advances in wine research**. Washington, DC: American Chemical Society, 2015. p. 131- 146. DOI: http://doi.org/10.1021/bk-2015-1203.ch009.

HOFF, R. **Análise qualitativa e quantitativa do relevo de vinhedos a partir de imagem ALOS em Encruzilhada do Sul, Brasil**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2021a. 14 p. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/228324/1/Projeto-Encruzilhada-do-Sul-Nota-Tecnica-analise-do-relevo-04nov2021.pdf. Acesso em: 01 out. 2024.

HOFF, R. **Investigação de índices de vegetação de vinhedos a partir de imagens Sentinel-2 em Encruzilhada do Sul, Brasil.** Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, dez. 2021b. 39 p. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/228323/1/Projeto-Encruzilhada-do-Sul-Nota-Tecnica-indices-de-vegetacao-04nov2021.pdf. Acesso em: 01 out. 2024.

HOFF, R.; DUCATI, J. R.; FARIAS, A. R. GIS and remote sensing to support precision viticulture for analysis of vineyards in the Campanha Wine Region, Brazil. **Journal of Environmental & Agricultural Sciences**, v. 10, p. 20-32, 2017. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/161041/1/GIS-RemoteSensing-Precision-Viticulture-2016-1.pdf. Acesso em: 01 out. 2024.

HOFF, R.; DUCATI, J. R.; BERGMANN, M. Comparação de dados de modelo digital de elevação - MDE: ASTER e SRTM por processamento digital de imagem para identificação de terroir vitivinícola na Folha Encruzilhada do Sul. RS. Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. 14., 2009. Santos. **Anais** [...]. São José dos Campos: INPE, 2009. p. 215-222. Disponível em: http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.02.00.46. Acesso em: 01 out. 2024.

HOLMES, E.; WILSON, I. D.; LINDON, J. C. An overview of metabolic phenotyping and its role in systems biology. In: LINDON, J. C.; NICHOLSON, J. K.; HOLMES, E. (eds.). **The Handbook of Metabolic Phenotyping**. Oxford: Elsevier,

2019. p. 1-51. DOI: http://doi.org/10.1016/B978-0-12-812293-8.00001-3.

HUNTER, J. J.; VOLSCHENK, C. G.; MANIA, E.; VICENTE CASTRO, A.; BOOYSE, M.; GUIDONI, S.; PISCIOTTA, A.; LORENZO, R.; NOVELLO, V.; ZORER, R. Grapevine row orientation mediated temporal and cumulative microclimatic effects on grape berry temperature and composition. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 310, p. 108660, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108660.

JASSE, A.; BERRY, A.; ALEIXANDRE-TUDO, J. L.; POBLETE-ECHEVERRÍA, C. Intra-block spatial and temporal variability of plant water status and its effect on grape and wine parameters. **Agricultural Water Management**, v. 246, p. 106696, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106696.

JUNGES, A. H.; PAULETTO, H.; ALBERTI, R.; H.; HOFF, R.; DUCATI, J. R. **Orbital remote sensing to monitoring vine cycle using vegetation index in "Campanha Region", Rio Grande do Sul Statee, Brazil**. 2017. Disponível em: https://www.giesco.org/article-orbital-remote-sensing-to-monitoring-vine-cycleusing-vegetation-index-in-%E2%80%9Ccampanha-region%E2%80%9D-riograndedo-sul-state-brazilteledectection-orbital-pour-la-surveillance-du-cycle-de-la-vignepar-859.html. Acesso em: 01 out. 2024.

KELLER, M. **The science of grapevines:** anatomy and physiology. 2nd ed. New York: Academic Press, 2015.

KING, P. D.; SMART, R. E.; McCLELLAN, D. J. Within-vineyard variability in vine vegetative growth, yield, and fruit and wine composition of Cabernet Sauvignon in Hawke's Bay, New Zealand. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. 20, 2014, p. 234-246. DOI: http://doi.org/10.1111/ajgw.12080.

MACDONALD, S. L.; STAID, M.; STAID, M.; COOPER, M. L. Remote hyperspectral imaging of grapevine leafroll-associated virus 3 in Cabernet Sauvignon vineyards. **Computers and Eletronics in Agriculture**, v. 130, p. 109-117, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.10.003.

MANNINI, F.; DIGIARO, M. The effects of viruses and viral diseases on grapes and wine. In: MENG, B.; MARTELLI, G. P.; GOLINO, D. A.; FUCHS, M. (eds.). **Grapevine viruses:** molecular biology, diagnostics and management. Cham: Springer, 2017. p. 453-482. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-319-57706-7_23.

MELLO, L. M. R; MACHADO, C. A. E. **Vitivinicultura brasileira:** panorama 2019. Beto Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2020. (Comunicado Técnico, 214). Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1124189. Acesso em: 01 out. 2024.

MIELE, A.; FLORES, C. A., FILIPPINI ALBA, J. M. Status atual da pesquisa de viticultura de precisão no Rio Grande do Sul: primeiros resultados da UP Uva para Vinho. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (eds.). **Agricultura de precisão:** um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 267-272.

MIELE, A.; FLORES, C. A.; FILIPPINI ALBA, J. M. Efeito da variabilidade espacial de solos no Vale dos Vinhedos na composição do vinho Merlot - Safra 2012. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; NAMASU, R. Y. (eds.). **Agricultura de precisão:** resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 361-367.

NAIDU, R. A.; MAREE, H. J.; BURGER, J. T. Grapevine leafroll disease and associated viruses: a unique pathosystem. **Annual Review of Phytopathology**, v. 53, p. 613-634, 2015. DOI: http://doi.org/10.1146/annurev-phyto-102313-045946.

OLDONI, H.; COSTA, B. R. S.; BOGNOLA, I. A.; SOUZA, C. R.; BASSOI, L.H . Homogeneous zones of vegetation index for characterizing variability and site-specific management in vineyards. **Scientia Agricola**, v. 78, n. 4, p. 1-11, 2021. DOI: http://doi.org/10.1590/1678-992x-2019-0243.

PALACIOS, F.; DIAGO, M. P.; MELOPINTO, M.; TARDAGUILA, J. Early yield prediction in different grapevine varieties using computer vision and machine learning. **Precision Agriculture**, v. 24, pp. 407-435, 2023. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-022-09950-y.

PEREIRA, G. E.; GAUDILLERE, J.; HILBERT, G.; SOYER, J.; VAN LEEUWEN, C.; LAVIALLE, O.; MOING, A.; DEBORDE, C.; MAUCOURT, M.; ROLIN, D. 1H NMR metabolic fingerprints of grape berries produced in different plots in Bordeaux-France. **Acta Horticulturae**, v. 689, p. 257-263, 2005. DOI: http://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.689.30.

PEREIRA, G. E.; GAUDILLERE, J.; VAN LEEUWEN, C.; HILBERT, G.; MAUCOURT, M.; DEBORDE, C.; MOING, A.; ROLIN, D. Microclimate influence on mineral and metabolic profiles of grape berries. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 54, p. 6765-7-6775, 2006a.

PEREIRA, G. E.; GAUDILLERE, J.; VAN LEEUWEN, C.; HILBERT, G.; MAUCOURT, M.; DEBORDE, C.; MOING, A.; ROLIN, D. 1H NMR metabolite fingerprintings of grape berry: Comparison of vintage and soil effects in Bordeaux grapevine growing areas. **Analytica Chimica Acta**, v. 563, p. 346-352, 2006b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.aca.2005.11.007

PEREIRA, G. E.; GAUDILLERE, J.; VAN LEEUWEN, C.; HILBERT, G.; MAUCOURT, M.; DEBORDE, C.; MOING, A.; ROLIN, D. 1H NMR metabolic profile of wines from three cultivars, three soil types and two contrasting vintages. **Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin**, v. 41, n. 2, p. 103-109, 2007.

PEREIRA, G. E.; GUERRA, C. C.; AMORIM, F. F. de; NASCIMENTO, A. M. de S.; SOUZA, J. F. de; LIMA, L. L. de A.; LIMA, M. dos S.; PADILHA, C. V. da S.; PROTAS, J. F. da S.; ZANUS, M. C.; TONIETTO, J. Vinhos tropicais do semiárido do Brasil: desvendando o potencial vitivinícola desta nova fronteira geográfica do vinho. **Territoires du Vin**, v. 9, p. 1-13, 2018.

PEREIRA, G. E.; PADHI, E. M. T.; SUDARSHANA, M. R.; FIALHO, F. B.; MEDINA-PLAZA, C.; GIRARDELLO, R. C.; TSENG, D.; BRUCE, R. C.; ERDMANN, J. N.; SLUPSKY, C. M.; OBERHOLSTER, A. Impact of grapevine red blotch disease on primary and secondary metabolites in 'Cabernet Sauvignon' grape tissues. **Food Chemistry**, v. 342, pp. 128312, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128312.

PEREIRA, G. E.; TONIETTO, J.; ZANUS, M. C.; SANTOS, H. P. dos; PROTAS, J. F. S.; MELLO, L. M. R. **Vinhos no Brasil:** contras-

tes na geografia e no manejo das videiras nas três viticulturas do país. 2020. (Documentos 121). Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/219851/1/Doc121-21.pdf. Acesso em: 01 out. 2024.

PEYNAUD, E. **Connaissance et travail du vin.** Paris: Editora Dunod, 1997. 341 p.

PITHAN, P.; DUCATI, J.; GARRIDO, L. da; ARRUDA, D. C.; THUM, A.; HOFF, R. Spectral characterization of fungal diseases downy mildew, powdery mildew, black-foot and Petri disease on Vitis vinífera leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v. 42, p. 5680-5697, 2021.

PITHAN, P.; GARRIDO, L.; ARRUDA, D.; THUM, A.; HOFF, R.; DUCATI, J. Disease-induced alterations in the reflectance spectrum of grape leaves. In: CONGRESS OF GROUP OF INTERNATIONAL EXPERTS OF VITIVINICULTURAL SYSTEMS FOR CO-OPERATION, 21., 2019, Tessalônica. **Proceedings** [...]. Tessalônica: Aristotle University of Thessaloniki, 2019. p. 602-605.

REYNIER, A. **Manuel de viticulture**. 10. ed. Paris: Lavoisier, 2007. 532 p.

SAMS B.; BRAMLEY, R.G.V.; SANCHEZ, L.; DOKOOZLIAN, N.; FORD, C.; PAGAY, V. Remote sensing, yield, physical characteristics, and fruit composition variability in Cabernet Sauvignon vineyards. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 73, n. 2, p. 93-105, 2022. DOI: http://doi.org/10.5344/ajev.2021.21038.

SANTESTEBAN, L.G. Precision viticulture and advanced analytics: a short review. **Food Chemistry**, v. 279, p. 58-62, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.140.

SANTOS, H. P.; SOUZA, P. V. D.; MARODIN, G. A. B.; ZINI, C. A. Manejo fitotécnico da videira, visando aprimorar produção e qualidade enológica da uva na Campanha Gaúcha. In: SILVEIRA, S. V. da; PROTAS, J. F. da S. (eds.). **Vinhos finos da região da Campanha gaúcha:** tecnologias para a vitivinicultura e para a estruturação de Indicação Geográfica. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2021. p. 81-116. (Documentos, 130). Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1142104/1/DOc-130-online-Cap3.pdf. Acesso em: 01 out. 2024.

SANTOS, H. P. Aspectos ecofisiológicos no manejo da videira. In: SILVEIRA, S. V. da; HOFFMANN, A.; GARRIDO, L. da R. (eds.). **Produção integrada de uva para processamento:** implantação do vinhedo, cultivares e manejo da planta. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 54-72. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/152932/1/Manual-3-Capitulo-5.pdf. Acesso em: 01 out. 2024.

SANTOS, M. S.; GEBLER, L.; SEBEM, E. Correlation between vegetation indexes generated at Vitis Vinifera L. and soil, plant and production parameters for emergency application in decision making. **Ciência Rural**, v. 52, n. 2, p. e20201037, 2022. DOI: http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20201037.

SCARLETT, N. J.; BRAMLEY, R. G. V.; SIEBERT, T. E. Within-vineyard variation in the "pepper" compound rotundone is spatially structured and related to variation in the land underlying the vineyard. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. 20, n. 2, p. 214-222, 2014. DOI: http://doi.org/10.1111/ajgw.12075.

SILVA-SANGOI, D. V.; HORST, T. Z.; MOURA-BUENO, J. M.; DALMOLIN, R. S. D.; SEBEM, E.; GEBLER, L.; SANTOS, M. S. Soil organic matter and clay predictions by laboratory spectroscopy: data spatial correlation. **Geoderma Regional**, v. 28, p. e00486, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00486.

TARDAGUILA, J.; STOLL, M.; GUTIÉRREZ, S.; PROFFITT, T.; DIAGO, M. P. Smart applications and digital technologies in viticulture: a review. **Smart Agricultural Technology**, v. 1, p. 100005, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.atech.2021.100005.

TISSEYRE, B.; MAZZONI, C; FONTA, H. Within-field temporal stability of some parameters in viticulture: Potential toward a site-specific management. **Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin**, v. 42, n. 1, p. 27-39, 2008.

TONIETTO, J.; FALCADE, I.; GUERRA, C. C.; ZANUS, M. C. As indicações geográficas de vinhos do Rio Grande do Sul. In: FERRONATTO, E. M. de O. (ed.). **Indicações Geográficas do Rio Grande do Sul registradas até março de 2021**. Brasília: MAPA/AECS, 2022. cap. 5, p. 71-94. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1142177/1/IGs-RS-Cap5.pdf. Acesso em: 01 out. 2024.

TONIETTO, J.; PEREIRA, G. E.; PEREGRINO, I.; REGINA, M. A. Potencial para a construção de Indicações Geográficas de vinhos de inverno do sudeste brasileiro. **Informe Agropecuário**, v. 41, p. 00, 2020. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/219233/1/Art-9-IA-312-25-nov-2020.pdf. Acesso em: 01 out. 2024.

VAN LEEUWEN, C.; BARBE, J.; DARRIET, P.; DESTRAC-IRVINE, A.; GOWDY, M.; LYTRA, G.; MARCHAL, M.; MARCHAND, S.; PLANTEVIN, M.; POITOU, X.; PONS, A.; THIBON, C. Aromatic maturity is a cornerstone of terroir expression in red wine. **OENO One**, v. 56, n. 2, p. 5441, 2022. DOI: https://doi.org/10.20870/oeno-one.2022.56.2.5441

VAN LEEUWEN, C.; FRIANT, P.; CHONE, X.; TREGOAT, O.; KOUNDOURAS, S.; DUBOURDIEU, D. Influence of climate, soil and cultivar on terroir. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 55, n. 3, p. 207-217, 2004. DOI: http://doi.org/10.5344/ajev.2004.55.3.207.

VAN LEEUWEN, C.; SEGUIN, G. The concept of terroir in viticulture. **Journal of Wine Research**, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2006.

YU, R.; BRILLANTE, L.; TORRES, N.; KURTURAL, S. K. Proximal sensing of vineyard soil and canopy vegetation for determining vineyard spatial variability in plant physiology and berry chemistry. **OENO One**, v. 2, p. 315-333, 2021. DOI: http://doi.org/10.20870/oeno-one.2021.55.2.4598.

ZANUS, M. C.; RIZZON, L. A.; KHUN, G. B. **Efeito da virose do enrolamento da folha na composição química do vinho Cabernet Franc**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 1993. (Comunicado Técnico, 11). Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/220935/1/Zanus-1992-219-226.pdf. Acesso em: 01 out. 2024.

Proposição metodológica de amostragem e geração de grade para aplicação em fruticultura de precisão

63

Methodological proposal for acceptance and generation of grade for application in precision fruit

Célia Regina Grego[1], Eduardo Antonio Speranza[2], Luciano Gebler[3]

[1] *Pesquisadora, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, celia.grego@embrapa.br*
[2] *Analista, Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, eduardo.speranza@embrapa.br*
[3] *Pesquisador, Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br*

RESUMO

A metodologia da agricultura de precisão aplicada e consolidada para grandes culturas requer aprimoramento quando aplicada à fruticultura, pois as diferenças em relação à fisiologia da planta, ao tamanho e ao espaçamento dos cultivos levam a diferentes respostas quando a tecnologia é aplicada. Essas diferenças requerem adaptações metodológicas para uma grade de amostras adequada a ferramentas que indicam a existência de dependência espacial. Assim, este capítulo tem como objetivo discutir a metodologia que possa auxiliar na definição da grade de amostragem otimizada para identificar a variabilidade espacial em fruticultura de precisão. Também é apresentado neste capítulo um estudo de caso para definição da grade mínima de amostragem em viticultura, que levou à conclusão de que a utilização de conjuntos de dados de atributos de solo e planta ao mesmo tempo proporcionam informações suficientes para que sejam utilizadas grades de até quatro amostras por hectare, capazes de identificar a variabilidade espacial da área e permitir a adoção da fruticultura de precisão. As pesquisas sobre o assunto são escassas, mas em estudos realizados até então, é consenso que, para uma melhor tomada de decisão quanto ao estabelecimento da grade amostral mínima em fruticultura, é fundamental considerar a temporalidade dos dados devido ao comportamento fisiológico das plantas, que pode variar de uma safra para outra. É possível inferir também que o impacto positivo do trabalho da fruticultura de precisão junto ao produtor depende dos níveis de acurácia que este deseja para seus resultados, e que é possível reduzir o número de amostras da grade desde que se tenha conhecimentos prévios do ambiente a ser amostrado no tempo e no espaço e das correlações entre variáveis indicativas da variabilidade.

Palavras-chave: dependência espacial; frutas; grades amostrais.

ABSTRACT

The methodology of precision agriculture applied and consolidated for large crops requires improvement when applied to fruit growing, as differences in plant physiology, size and spacing of crops lead to different responses when the technology is applied. These differences require methodological adaptations for a grid of samples suitable for tools that indicate the existence of spatial dependence. Thus, this chapter aims to discuss the methodology that can help define the optimized sampling grid to identify spatial variability in precision fruit growing. Also presented in this chapter is a case study for defining the minimum sampling grid in grapevines, which shows that the use of sets of data attributes that consider different factors at the same time (soil, plant tissue and vegetation indices) provide a wealth of information sufficient to use limited sampling grids of up to 4 samples per hectare, capable of identifying the spatial variability of the area and allowing the adoption of precision fruit growing. Research on the subject is scarce, but studies carried out so far show a consensus for a better decision-making regarding the establishment of the minimum sampling grid in fruit growing. It is fundamental to consider the temporality of the data due to the physiological issue of the plants that can vary rapidly from one season to another. Also, the positive impact of the precision fruit growing work with the producer depends on the levels of accuracy that the producer wants for his results and it is possible to reduce the grid samples to the minimum levels safely, provided that one has prior knowledge of the environment to be sampled in time and space and the correlations between variables indicative of variability.

Keywords: spatial dependence; fruits; sample grids.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000036

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

Em fruticultura, muito experimentos, como os de competição de variedades, de tipos de insumos e de manejo da cultura, não levam em consideração o efeito de variabilidade do solo. Porém, a uniformidade de propriedades do solo raramente existe e não pode ser simplesmente pressuposta sem uma adequada averiguação (Goovaerts, 1997; Vieira, 2000; Vieira et al., 2008). A ferramenta de análise geoestatística existe para comprovar a existência dessa variabilidade espacial. Os parâmetros da variabilidade, como o alcance, indicam o tamanho das manchas existentes no mapeamento para as características avaliadas. Somente pelos ajustes dos semivariogramas (Vieira, 2000) já se pode dizer que é praticamente impossível ter locais homogêneos para disposição de parcelas em determinada área. Entretanto, é por meio de uma amostragem detalhada que as variações espaciais serão detectadas adequadamente para posterior elaboração de mapas precisos e delimitação de áreas de manejo diferenciadas.

A Agricultura de Precisão (AP), quando aplicada na fruticultura, diferentemente dos grãos onde está bastante consolidada, possui como um dos grandes gargalos a necessidade de definição adequada em relação ao número de pontos georreferenciados e sua distribuição na área cultivada, que permita a identificação da variabilidade espacial dos fatores ambientais e produtivos. Uma amostragem adequada, baseada no histórico da área, nos índices de vegetação obtidos por imagens de satélite e nos dados de sensores, podem contribuir para essa assertividade em relação ao número e à distância entre pontos de amostragem para a fruticultura. Segundo Vieira et al. (2008), em se tratando de variabilidade espacial, as amostragens devem ser suficientemente próximas para conseguir caracterizar as possíveis manchas de variabilidade e com as imagens aéreas, com as quais se possa identificar regiões com diferentes níveis de verde, é possível direcionar as amostragens, concentrando-as nas regiões onde existir maior variabilidade e diminuindo-se a sua densidade nos locais mais uniformes.

A utilização de sensores remotos e de campo que permitam a descrição ou correlação dos parâmetros reais de solo e de planta, de acordo com Cirani e Moraes (2010), permitiria uma redução de custos de amostragem e aumento do grau de adoção da tecnologia do uso de sensores. Um dos parâmetros obtidos por sensores que vêm sendo utilizados como indicativo de variabilidade é a condutividade elétrica aparente dos solos (Molin et al., 2005). Sua determinação em áreas de fruticultura seria de grande importância para correlacioná-la com argila do solo, umidade do solo, capacidade de troca catiônica, teores de cálcio, magnésio e matéria orgânica e relevo.

Assim, este capítulo tem como objetivo discutir a metodologia que possa auxiliar na definição da grade de amostragem otimizada para identificar a variabilidade espacial por meio da geoestatística em áreas de fruticultura.

2 INTRODUÇÃO À FRUTICULTURA DE PRECISÃO

Há fontes de que a fruticultura de precisão começou com trabalhos na citricultura e na viticultura para a elaboração de vinhos. Segundo Gemtos et al. (2013), o uso intensivo da tecnologia na fruticultura de precisão ocorreu na década de 1990 em pomares mecanizados de uva para produção de vinho, e nos anos 2000 passou a ser utilizada em plantios de frutas colhidas manualmente. A partir de então, a fruticultura de precisão vem trazendo às áreas produtivas a possibilidade de ampliar sua capacidade de organização, de produção e, ao mesmo tempo, reduzir os impactos ambientais causados tradicionalmente pela atividade agrícola. Pesquisas também foram intensificadas e o conhecimento sobre novas tecnologias pesquisadas em fruticultura de precisão no Brasil vem aproximando o setor produtivo da pesquisa.

A fruticultura de precisão pode ser aplicada em propriedades de qualquer tamanho, por meio da organização e coleta de dados no campo e geração de informações para aumentar a eficiência do setor, principalmente no manejo do ambiente produtivo e uso de mão de obra. O trabalho manual dos agricultores em pequenas áreas, que reconhece as diferenças entre talhões, é beneficiado com técnicas que levam em conta a variabilidade espacial do solo de cada direção do pomar e até de cada planta, permitindo, por meio de mapas, o manejo e o uso preciso dos insumos. Atualmente, segundo Hoff et al. (2011), técnicas como o sensoriamento remoto, que utiliza imagens de satélite, imagens de veículo remotamente tripulado (ARP) e sensores de campo, trazem resultados importantes para monitorar os índices de vegetação das frutíferas no tempo e no espaço em todo o ciclo fenológico da cultura.

Os três principais elementos para a adoção da fruticultura de precisão são: a geração de informação sobre a área de cultivo e sua variabilidade, o processamento dessas informações e o gerenciamento do pomar baseado nessas informações (Gebler; Bueno, 2015). Os autores salientam ainda que se deve levar em consideração a diferença entre a fruticultura de precisão voltada à industrialização e a destinada à produção de frutas para o consumo *in natura*, pois nesse últi-

mo caso a análise temporal é ainda mais importante para a tomada de decisão.

Nas culturas anuais de grãos, a agricultura de precisão é bastante consolidada. Tanto a grade amostral quanto os mapas de produtividade são gerados de forma consolidada, prática e confiável (Molin et al., 2015). No entanto, no caso da fruticultura, segundo Gebler (2017), ainda faltam ser estabelecidos critérios para a adequada implantação da Agricultura de Precisão para a padronização de ações, processos e equipamentos. Para os mapas de colheita, por exemplo, por ser predominantemente manual na fruticultura, o método de mapeamento de produtividade deve ser adaptado. Na fruticultura, a investigação tanto da variabilidade espacial quanto temporal é importante, pois as plantas podem apresentar respostas no segundo ou terceiro ano após uma ação corretiva. Assim, é possível a geração e análise dos mapas de anos anteriores e obter a resposta da tendência dentro dos talhões do pomar. É necessário analisar os mapas dentro do talhão, considerando a variabilidade no ano corrente, comparando com anos anteriores. Além disso, os indicadores a serem utilizados pela fruticultura de precisão se distanciam das características da agricultura de precisão para grãos, considerando as diferenças quanto ao tamanho da área e a forma de distribuição das plantas na área de produção, onde o fator qualidade tem peso importante na avaliação das frutíferas perenes.

Certamente, quando se trata de fruticultura de precisão, há demanda de novos esforços em termos de pesquisa para estabelecimento de diretrizes de obtenção e tratamento dos dados e da informação. Nesse contexto, um dos aspectos fundamentais que carece de estudos em fruticultura de precisão é a questão da amostragem. É fato que a amostragem georreferenciada distribuída ao longo do campo deve ser suficiente para caracterizar a variabilidade espacial, ou seja, a amostragem pode ser adequada se o espaçamento entre as amostras for menor do que as "manchas" que se quer caracterizar. Para toda amostragem deverá ser considerado que as amostras retiradas de algum ponto no espaço fazem parte de uma função contínua. No entanto não existe uma receita padrão para a determinação do número de pontos e da distância entre pontos, pois tudo depende das características da área e cultura amostrada, do histórico de manejo, dos recursos financeiros e humanos disponíveis, do tempo disponível e da variável a ser avaliada espacialmente. O que pode auxiliar no direcionamento da distribuição de pontos é o uso de variáveis indicativas, como mapas de solo e de relevo preexistentes, e também o uso de informações provenientes de imagens de satélite e sensores de campo.

Vieira et al. (2008) apresentam quatro tipos de grades de distribuição de pontos comumente utilizadas em estudos de variabilidade espacial, conforme a Figura 1. a) Grade retangular ou quadrada, para quando não se sabe nada ou pouco se sabe a respeito da área; b) Grade com "ilhas" com concentração de amostras mais próximas, com objetivo de fornecer informações em pequenas distâncias sem aumentar o número de amostras; c) Grade trapezoidal, na qual as colunas intercaladas têm um deslocamento de metade da distância entre linhas no sentido dos eixos x e y, sendo a menor distância entre pontos a diagonal; e d) Ao acaso, que é a amostragem espacialmente distribuída sem nenhuma ordem, seguindo as necessidades de caminhamento no campo.

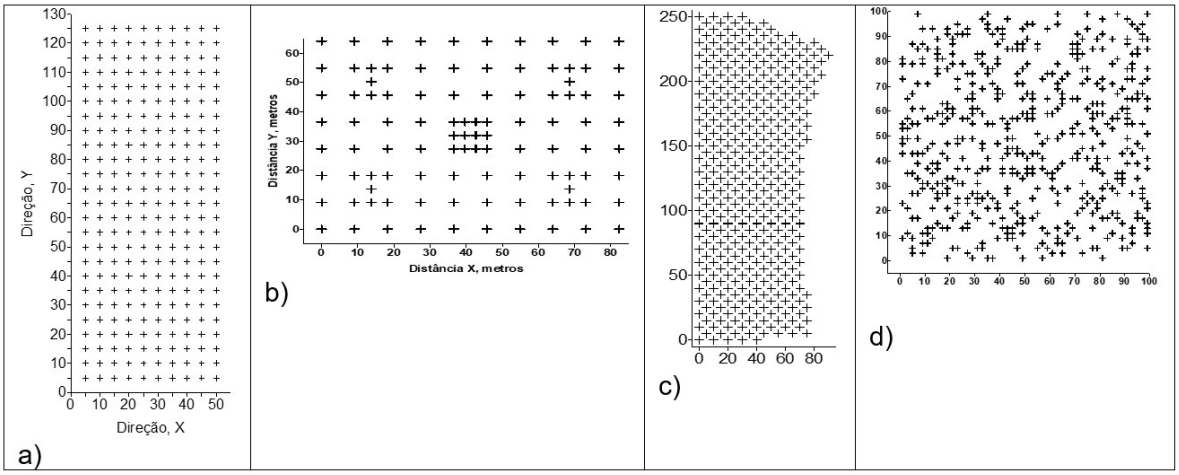


Figura 1. Tipos de grades de amostragem a) Quadrada ou retangular; b) Em ilhas; c) Trapezoidal; d) Ao acaso.
Fonte: Vieira et al. (2008).

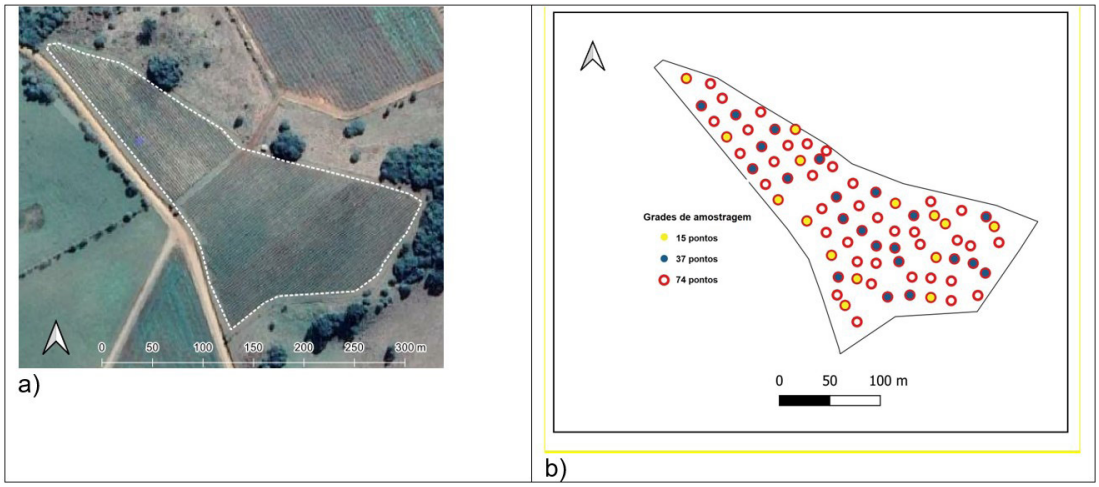


Figura 2. a) Área de cultivo da videira e b) Distribuição das três grades de amostragem com 74, 37 e 15 pontos na área de estudo.

Segundo Vieira et al. (2008), a definição da quantidade de amostras é tarefa difícil e um número não pode ser simplesmente fixado sem um conhecimento prévio do ambiente que se quer amostrar.

3 ESTUDO DE CASO PARA DEFINIÇÃO DE GRADE AMOSTRAL EM VITICULTURA

Este estudo de caso foi uma proposta metodológica relatada por Speranza et al. (2021), baseada em análise de dados, para sugerir grades amostrais mínimas necessárias para identificar a variabilidade espacial do solo e da videira.

A área de estudo possui 3,69 ha, com coordenadas O 51º 15' 7.248'' e S 28º 23' 15.185'', no município de Muitos Chapões (RS), é cultivada com as videiras "Pinot Noir", "Chardonnay" e "Merlot", com mesmo manejo adotado para as três cultivares (Figura 2a)

Os dados coletados referem-se à safra 2019/2020 e são compostos por variáveis de solo nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm (física e química), e de planta (produção, química do tecido vegetal e índices de vegetação).

As variáveis físicas do solo obtidas foram: umidade (g g^{-1}); areia (%); silte (%) e argila (%). Para a química do solo, foram obtidas as seguintes variáveis: pH em agua; fósforo (mg dm^{-3}); potássio (cmol dm^{-3}) matéria orgânica (%); alumínio (cmol$_c$ dm^{-3}); cálcio (cmol$_c$ dm^{-3}); magnésio (cmol$_c$ dm^{-3}); CTC efetiva e CTC a pH 7 (mmol$_c$ dm^{-3}); zinco (mg dm^{-3}); cobre (mg dm^{-3}); enxofre (mg dm^{-3}); boro (mg dm^{-3}) e condutividade elétrica (mS m^{-1}).

As variáveis referentes à planta, relacionadas à qualidade e quantidade da produção, foram: teor de sólidos solúveis (ºBx); acidez total (meq L^{-1}); quantidade (número total) de cachos a cada três plantas; peso de três cachos e produtividade (gramas). Para as variáveis da análise química do tecido vegetal, foram obtidos: nitrogênio TKN[1] (%); fósforo total (%); potássio total (%); cálcio total (%); magnésio total (%); enxofre total (%); cobre total (mg kg^{-1}); zinco total (mg kg^{-1}); ferro total (mg kg^{-1}); manganês total (mg kg^{-1}) e boro total (mg kg^{-1}). Adicionalmente, foram obtidos dois índices de vegetação ao longo do ciclo de produção na mesma grade amostral utilizada para a coleta dos dados de solo e planta, a partir de sensoriamento proximal. Foram determinados os valores médios do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e do EVI (Enhanced Vegetation Index), que consideram a banda do infravermelho próximo no seu cálculo e são amplamente utilizados em aplicações agrícolas.

A grade espacial de amostras dos dados originalmente foi de 74 pontos distribuídos em aproximadamente 20 amostras por hectare. No intuito de verificar o número adequado de pontos para otimizar a coleta, foram testadas três grades de amostragem (74 pontos originais, 37 pontos e 15 pontos). Foi adotada a redução do número de pontos de acordo com a eliminação de pontos mais próximos, conforme a Figura 2b.

Foi realizada a análise geoestatística para todas as variáveis nas três grades predeterminadas. A análise foi composta pelo ajuste do semivariograma para cada um dos atributos selecionados, conforme indicado por Vieira (2000) a um dos modelos mais frequente (esférico, exponencial e gaussiano), que por sua vez forneceram os parâmetros de ajuste utilizados pelo método de interpolação espacial por krigagem ordi-

[1] Total Kjeldahl Nitrogen: método de referência para determinação de nitrogênio.

nária (Oliver; Webster, 1990), para que pudessem ser gerados os mapas com melhor precisão considerando a existência de dependência espacial. Construíram-se mapas de contornos em função das coordenadas geográficas em SIG (QGIS 3.10), e os programas utilizados para análise geoestatística foram os desenvolvidos por Vieira (2000).

Para os atributos que apresentaram dependência espacial nas 3 grades de amostragem, foram realizadas análises de agrupamento para obtenção dos mapas de zonas diferenciadas de manejo. O atributo relacionado à produtividade serviu como referência para essas análises. Para o processo de agrupamento dos dados interpolados, foi utilizada a abordagem de agrupamento hierárquico SWMU Clustering. Essa abordagem permite que sejam obtidos agrupamentos com reduzida estratificação espacial quando estes são exibidos em forma de mapa. Neste trabalho, foram consideradas retificações espaciais nos mapas de saída a partir de 5 grupos, que limita o tamanho mínimo espacial (área) de um grupo em pelo menos 5% da área total de estudo. Foi definido também um intervalo válido (frequentemente utilizado para o delineamento em agricultura de precisão) de 2 a 5 grupos para cada configuração utilizada. Os mapas de zonas de manejo obtidos a partir de análise de agrupamento foram avaliados com relação à sua capacidade em reduzir a variância da produtividade da área, por meio do índice de redução de variância. Também foi avaliada a verificação da concordância dos mapas obtidos considerando apenas a variável de produtividade, por meio do coeficiente de Kappa (Cohen, 1960). Esse coeficiente é um índice estatístico capaz de verificar a concordância entre dois mapas considerando uma tabela de contingência cruzada, com valor de kappa variando de 1 (completa concordância) até 0 (sem concordância). De acordo com Kitchen et al. (2005), valores altos do índice Kappa (próximos de 1) ocorrem quando a concordância espacial entre dois mapas é máxima.

Essa análise de agrupamento pode levar a indicativos para a necessidade de grades amostrais mais ou menos precisas, utilizando diferentes grupos de atributos e diferentes resoluções de grades amostrais de origem que proporcionam maiores reduções de variância da produtividade e maiores concordâncias com relação a mapas de zonas de manejo que consideram a produtividade.

Após a análise geoestatística, foi verificado que houve grande redução da variabilidade espacial das 83 variáveis analisadas, quando se reduziu o número de amostras, principalmente na grade de 15 pontos (12 variáveis), comparando com 37 pontos (52 variáveis) e com a grade original de 74 pontos (63 variáveis). Essa redução da dependência espacial foi gradativa quando se reduziu o número de pontos para os dados de produção e tecido vegetal. Para os dados de física e química do solo, houve redução de 80% das variáveis com dependência espacial quando se reduziu de 75 para 15 pontos. No entanto, com 37 pontos praticamente o número de ajustes foi o mesmo do que para 74 pontos, sem prejuízo para a representatividade da dependência espacial para essas variáveis. Para as variáveis relacionadas aos índices de vegetação, houve redução de 40% das variáveis com dependência espacial quando foi reduzido o número de pontos de 74 para 37 pontos, e aproximadamente 90% a menos de variáveis com dependência espacial quando se adotou a grade de 15 pontos.

No geral, considerando todas as variáveis estudadas, com a redução do número de pontos de 74 para 37 e 15 pontos, houve grande redução no número de variáveis com dependência espacial, principalmente na grade de 15 pontos. Quando foram comparadas a grade de 74 pontos com a de 37, houve ainda 83% de dependência espacial para o total de variáveis. Isso evidencia, segundo Speranza et al. (2021), ser possível essa redução de pontos de amostragem, desde que distribuídos adequadamente em toda área de estudo, gerando economia de tempo e recursos no processo de obtenção das informações e consequentemente menor custo de produção. No entanto, os resultados não indicam uma alternativa adequada reduzir para menos da metade dos pontos como na grade de 15 pontos onde houve apenas 19% das variáveis com variabilidade espacial comparadas com a grade original de 74 pontos.

Na Figura 3 estão representados os mapas obtidos por interpolação de valores pelo método da krigagem ordinária para as 12 variáveis que apresentaram dependência espacial nas três grades utilizadas. Não houve mudanças no padrão espacial em relação às manchas de variabilidade espacial nos mapas; no entanto, houve redução do número de variáveis que apresentaram dependência espacial quando se reduziu o número de pontos de amostragem de 74 para 15 pontos.

Os dados de entrada considerados para os algoritmos de agrupamento foram: para o grupo I todos os atributos; para o grupo II, atributos relacionados ao tecido vegetal; para o grupo III, atributos relacionados ao solo; e para o grupo IV, atributos relacionados aos índices de vegetação. Considerando cada um desses quatro grupos e seus respectivos mapas interpolados (com grades iniciais de 15, 37 e 74 amostras),

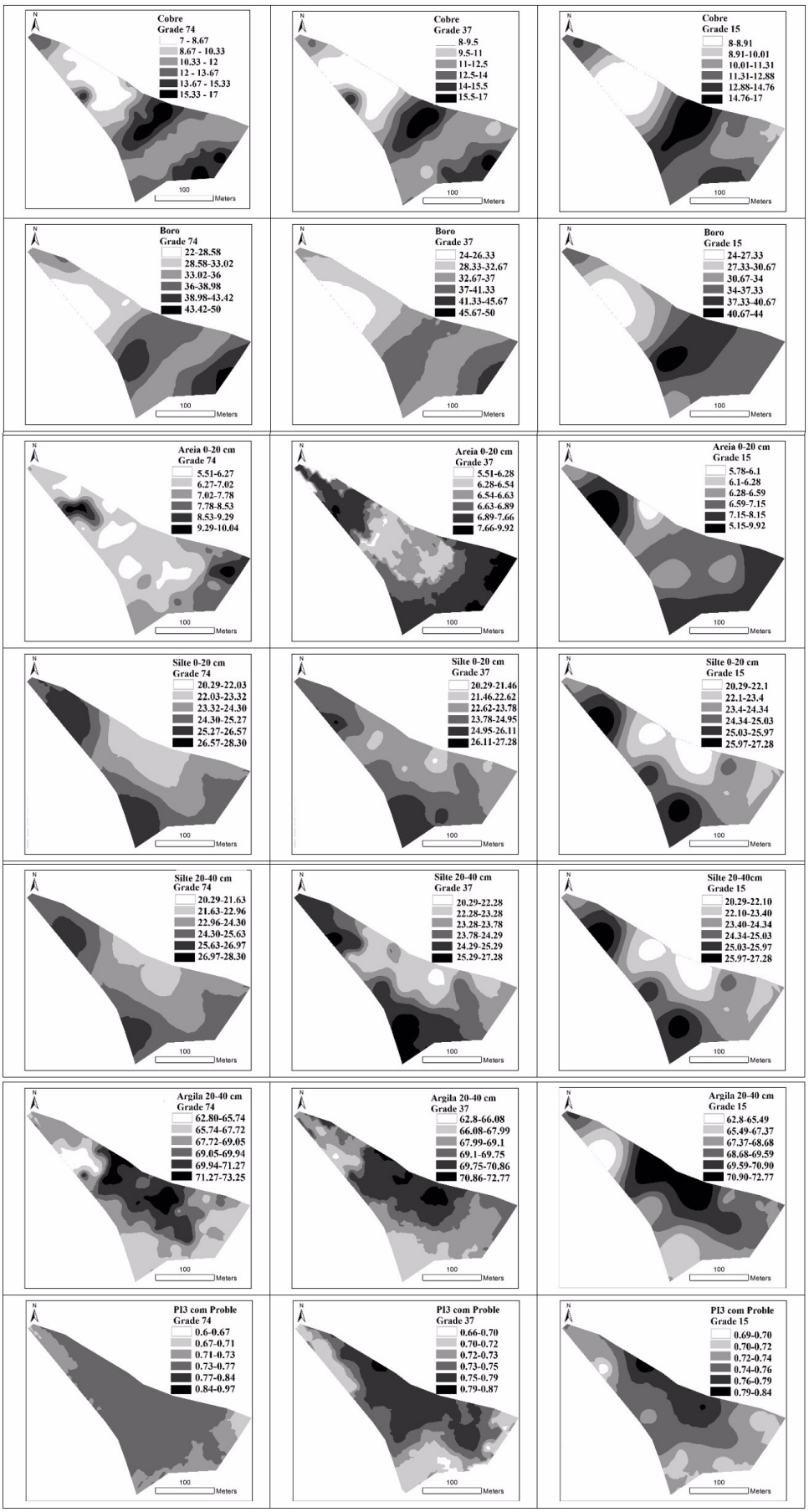


Figura 3. Mapas interpolados para as variáveis que apresentaram dependência espacial nas três grades de amostragem.
Fonte: Speranza et al. (2021).

foram gerados agrupamentos utilizando 12 diferentes combinações de dados de entrada.

Considerando os mapas gerados a partir das análises geoestatísticas, para cada um dos testes, realizados com diferentes atributos de entrada (grupos I, II, III e IV), foram obtidos valores da redução de variância da produtividade e a concordância dos mapas de zonas de manejo (ZM) gerados com diferentes grupos de atributos em relação aos mapas de ZM gerados com o atributo de produtividade. A variável n indica a quantidade de amostras (pontos) de campo utilizadas antes da interpolação espacial; a variável p indica a quantidade de atributos (variáveis) utilizados; e a variável k indica o número de grupos ou ZMs utilizados. A utilização de uma quantidade maior de atributos com variabilidade espacial detectada (p=12) contribuiu de maneira positiva para a geração de mapas de ZM com boa qualidade com relação à distribuição espacial, independentemente do valor de n (Tabela 1).

Considerando os valores de RV exibidos na Tabela 1, é possível observar que a utilização de n=15 proporcionou grande redução da variância da produtividade.

Considerando o grupo II, mesmo com a utilização de poucos atributos (p=4), a redução de variância da produtividade é relevante (Tabela 2), indicando que os dados de tecido vegetal são adequados para o manejo da fruticultura de precisão na videira em um intervalo entre 4 e 10 amostras por hectare para a área de estudo, sem comprometer a qualidade final dos mapas.

Utilizando apenas os dados de solo houve redução da variância da produtividade para todos valores de n, mantendo mapas de ZM bem distribuídos espacialmente (Tabela 3). Nesse caso, pode ser observado que, para a grade n=15, os valores de RV foram muito superiores em comparação com as outras grades, chegando ao valor máximo de 100.

Com os índices de vegetação, a análise mostrou uma tendência maior de utilização das grades n=37 e n=15, que apresentaram mapas de ZM com uma distribuição espacial melhor definida em comparação com os mapas obtidos com dados na grade n=74 (Tabela 4). Assim como ocorre para os atributos relacionados ao tecido vegetal, os índices de vegetação são mais sensíveis à variabilidade quando comparados com as amostragens de solo e, para esse caso em específico, a grade com n=37 aparenta ser a mais adequada (10 amostras por hectare), conforme dados de RV exibidos na Tabela 4.

Em análise complementar aos resultados dos mapas de ZM e de valores de RV, foi utilizado o índice Kappa para comparar os mapas de ZM, considerando apenas os dados de produtividade (ZM-Prod), com os mapas de ZM obtidos considerando os atributos dos grupos I, II, III e IV (Figura 4).

Os valores de Kappa (Figura 4) mostram uma forte concordância entre os mapas ZM-Prod em relação ao grupo IV (ZM-IV) com os mapas gerados a partir da grade n=37. Já para ZM-I, II III a concordância foi maior para os obtidos a partir de dados com grades amostrais de menor resolução espacial n=15. No entanto, amostragem no n=15 não foi suficiente para expressar uma adequada variabilidade espacial, reduzindo muito o número de variáveis de solo para mapeamento. Uma alternativa prática para identificar essa baixa variabilidade antes de efetivamente realizar as amostragens seria o uso de variáveis indi-

Tabela 1. Mapas de zonas de manejo e respectivos valores de redução da variância (RV) considerando o grupo I (todos os atributos). Adaptado de Speranza et al. (2021).

n/k	2	3	4	5
74				
RV	2,20	5,72	32,03	32,27
37				
RV	0,25	1,46	10,11	30,47
15				
RV	27,00	28,68	30,84	34,19

Tabela 2. Mapas de zonas de manejo e respectivos valores de redução da variância (RV) considerando o grupo II (tecido vegetal). Adaptado de Speranza et al. (2021).

n/k	2	3	4	5
74				
RV	15,34	27,13	28,83	40,86
37				
RV	28,34	30,16	30,17	48,82
15				
RV	19,37	29,81	36,46	51,99

Tabela 3. Mapas de zonas de manejo e respectivos valores de redução da variância (RV) considerando o grupo III (solo). Adaptado de Speranza et al. (2021).

n/k	2	3	4	5
74				
RV	0,39	3,46	4,15	23,68
37				
RV	0,96	7,73	11,15	15,63
15				
RV	81,52	100	100	100

Tabela 4. Mapas de zonas de manejo e respectivos valores de redução da variância (RV) considerando o grupo IV (índices de vegetação). Adaptado de Speranza et al. (2021).

n/k	2	3	4	5
74				
RV	1,63	3,07	16,52	16,74
37				
RV	23,26	24,76	51,31	51,69
15				
RV	22,51	22,54	42,28	43,25

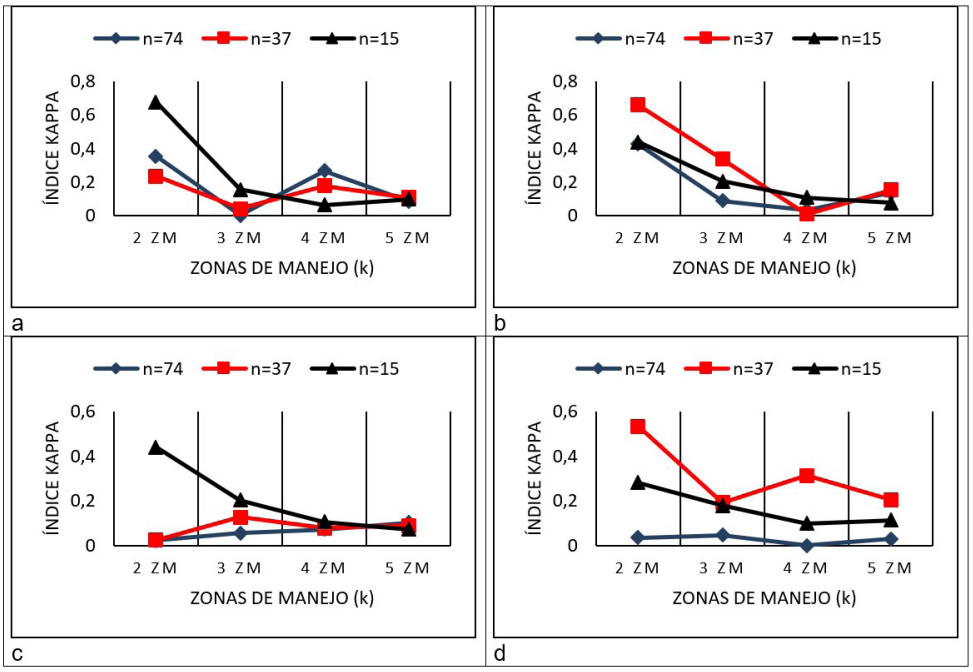


Figura 4. Índice Kappa para verificação de concordância entre mapas de zonas de manejo obtidos a partir de dados de produtividade (ZM-Prod) *versus* mapas de zonas de manejo obtidos a partir de atributos dos grupos a) I (ZM-I); b) II (ZM-II); c) III (ZM-III) e d) IV (ZM-IV). **Adaptado de:** Speranza et al. (2021).

cativas da variabilidade espacial do solo e da planta obtida por sensores, como as imagens de satélite, de Vant ou uso de sensores de campo (Vieira et al., 2008).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível inferir um impacto positivo no trabalho da fruticultura de precisão junto ao produtor, que hoje apresenta restrições no uso da tecnologia em razão das pequenas áreas envolvidas e dp grande número de pontos de amostragens exigidos para a adequada identificação da dependência espacial. Esse impacto depende dos níveis de acurácia que o produtor deseja para seus resultados. Estudos com maior exatidão, pode demandar os levantamentos com maior número de amostragens na grade; no entanto, é possível reduzir as amostras da grade, desde que se tenha conhecimentos prévios do ambiente a ser amostrado no tempo e no espaço e das correlações entre variáveis indicativas da variabilidade.

Para uma melhor tomada de decisão quanto ao estabelecimento da grade amostral mínima em fruticultura, é fundamental considerar a temporalidade dos dados devido à questão fisiológica das plantas, que podem variar de uma safra para outra.

O estudo de caso apresentado levou à conclusão de que a utilização de conjuntos de atributos de dados em videira que consideram diferentes fatores ao mesmo tempo (solo, tecido vegetal e índices de vegetação) proporcionam uma riqueza de informações suficiente para que sejam utilizadas grades amostrais limitadas de até quatro amostras por hectare, capazes de identificar de maneira satisfatória a variabilidade espacial da área e permitir a adoção da fruticultura de precisão. As indicações propostas neste estudo de caso podem estimular produtores de uva a adotar a tecnologia.

REFERÊNCIAS

CIRANI, C. B. S.; MORAES, M. A. F. D. Inovação na industria sucroalcooleira paulista: os determinantes da adoção das tecnologías de agricultura de precisão. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. *48*, n. 4, p. 543-565, 2010. DOI: http://doi.org/10.1590/S0103-20032010000400003.

COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. *20*, n. 1, p. 37-46, 1960. DOI: http://doi.org/10.1177/001316446002000104.

GEBLER, L. Fruticultura de precisão: uma análise dos desafios e uma nova visão de produção. **Agapomi**, n. 275, p. 10, 2017. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1069932/1/GeblerAgapomiN275P102017.pdf. Acesso em: 26 out. 2022.

GEBLER, L.; BUENO, M. B. Por que a fruticultura de precisão deve seguir princípios distintos dos utilizados na agricultura de precisão de grãos? In: *XLIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 2015, São Pedro*. **Anais** [...]. São Pedro: CONBEA, 2015. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digi-

tal/bitstream/item/138399/1/Gebler-Conbea-set2015.pdf. Acesso em: 26 out. 2022.

GEMTOS, T.; FOUNTAS, S.; TAGARAKIS, A.; LIAKOS, V. Precision agriculture application in fruit crops: experience in handpicked fruits. **Procedia Technology**, v. *8*, p. 324-332, 2013. DOI: http://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.043.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 476 p. DOI: http://doi.org/10.1093/oso/9780195115383.001.0001.

HOFF, R., FARIAS, A. R.; DUCATI, J. R.; TONIOLO, G. R. Aplicação de processamento digital de imagens orbitais e SIG para apoio à agricultura de precisão nas culturas da videira e macieira no Rio Grande do Sul. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (eds.). **Agricultura de precisão:** *um novo olhar*. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011.

KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; MYERS, D. B.; DRUMMOND, S. T.; HONG, S. Y. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *46*, n. 1-3, p. 285-308, 2005. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.012.

MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; PAULETTI, V.; SCHMIDHALTER, U.; HAMMER, J. Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção. **Engenharia Agrícola**, v. *25*, n. 2, p. 420-426, 2005. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-69162005000200015.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLACO, A. F. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 238 p.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. *4*, n. 3, p. 313-332, 1990. DOI: http://doi.org/10.1080/02693799008941549.

SPERANZA, E. A.; GREGO, C. R.; GEBLER, L. **Metodologia para sugestão de grades amostrais mínimas para monitoramento da variabilidade espacial de videiras**. Campinas: Embrapa Agricultura Digital, 2021.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, G. R. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. *v. 1*, p. 1-54.

VIEIRA, S. R.; XAVIER, M. A.; GREGO, C. R. Aplicações de geoestatística em pesquisas com cana-de-açúcar. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (eds.). **Cana de açúcar**. 1. ed. Ribeirão Preto: Instituto Agronômico, 2008. p. 839-852.

Mapas de NDVI para definição de unidades de manejo diferenciadas para a vitivinicultura

64

NDVI maps for the definition of differentiated management zones for wine vines

Júlia Faccin Faé[1], Luís Felipe Rossetto Gerlach[2], Alexandre Alan Cassinelli[3], Gabriel Rieder Marson[4], André Luis Vian[5], Antônio Luis Santi[6], Gilmar Arduino Bettio Marodin[7]

[1] *Acadêmica, Curso de Pós-Graduação em Fitotecnia, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), Brasil, juliaffae@gmail.com*

[2] *Acadêmico, Curso de Pós-Graduação em Fitotecnia, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), Brasil, lfelipeross@hotmail.com*

[3] *Acadêmico, Curso de Agronomia, Bolsista de Iniciação Científica, Departamento de Plantas de Lavoura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), Brasil, alexandrealanc@gmail.com*

[4] *Acadêmico, Curso de Agronomia, Bolsista de Iniciação Científica, Departamento de Plantas de Lavoura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), Brasil, grmarsong@gmail.com*

[5] *Prof. Dr., Departamento de Plantas de Lavoura, Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), Instituição, Porto Alegre (RS), Brasil, andre.vian@ufrgs.br*

[6] *Prof. Dr., Departamento de Ciências Agronômicas e Ambientais, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria (RS), Brasil, santi_pratica@yahoo.com.br*

[7] *Prof. Dr., Departamento de Horticultura e Silvicultura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), Brasil, marodin@ufrgs.br*

RESUMO

A utilização da Agricultura de Precisão (AP) na vitivinicultura brasileira é recente, e ainda se faz necessário o conhecimento e adaptabilidade das ferramentas de AP na cultura. O objetivo do presente trabalho é utilizar o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para definição de unidades de gestão diferenciadas (UGDs) como forma de entendimento da gestão da variabilidade espacial do vinhedo. Para realização do estudo, foram utilizadas duas quadras em um vinhedo comercial, das viníferas "Merlot" e "Chardonnay", onde foram determinadas três UGDs (alto, médio e baixo vigor), baseadas na média de sete mapas de NDVI ao longo de dois anos, em diferentes datas durante o ciclo da planta. Foram analisadas a produtividade e a qualidade da uva em 15 pontos amostrais distribuídos por três UGDs. Os resultados obtidos até o presente momento indicam que são necessárias adequações para a cultura da videira.

Palavras-chave: *Vitis vinifera*; vitivinicultura de precisão; NDVI; zonas de manejo.

ABSTRACT

The use of Precision Agriculture (PA) in Brazilian viticulture is recent and the knowledge and adaptability of PA tools in the culture is still necessary. The present work aims to use the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to define differentiated management units (DMUs) to understand the management of the spatial variability of the vineyard. Two plots in a commercial vineyard of Merlot and Chardonnay varieties were used to conduct the study, where three DGUs (high, medium and low vigor) were determined based on the average of seven NDVI maps over two years, at different dates during the plant cycle. Grape yield and quality were analyzed at 15 sampling points distributed over three UGDs. The results obtained so far indicate that adjustments are needed for the grapevine culture.

Keywords: *Vitis vinifera*; precision viticulture; NDVI; management zones.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000037

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

No setor vitivinícola, a utilização de ferramentas tecnológicas de Agricultura de Precisão (AP) é relativamente recente, conforme apresentado por Bramley e Hamilton (2004) e Arnó et al. (2009). A vitivinicultura brasileira apresenta uma grande aptidão frutícola do Brasil e especialmente no Rio Grande do Sul, porém, as adoções de tecnologias ainda não são amplamente utilizadas. Ainda existem diversos impasses para que se tenha uma maior adoção, como a adaptação das ferramentas disponíveis ao setor vitivinícola, sua empregabilidade e adaptabilidade às condições impostas pelos vinhedos. O auxílio das ferramentas de AP na vitivinicultura pode contribuir com o entendimento da variabilidade temporal e espacial do solo e da planta.

Tecnologias como sensoriamento remoto com o uso de índices de vegetação e monitoramento das condições de desenvolvimento das plantas auxiliam na gestão do vinhedo, através da definição de unidades de manejo diferenciadas, buscando incrementar a produção, a qualidade dos frutos e o retorno econômico.

A variabilidade espacial em vinhedos é observada corriqueiramente, ocorrendo em regiões dentro do vinhedo de produção que apresentam características como relevo, tempo de exposição solar, tipo de solo, textura do solo, perfil do solo, declividade, dentre outras, e que proporcionam diferentes potenciais produtivos no mesmo vinhedo (Miele et al., 2014). Assim, propôs-se a geração de unidades de gestão diferenciada (UGDs) por meio de Índices de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), permitindo que a identificação de regiões mais homogêneas dentro dos vinhedos, ou seja, regiões que apresentam uma mínima variabilidade espacial e que se mantêm ao longo dos anos (Mann et al., 2010). Essas UGDs são delimitadas geralmente por mapas de fatores não antrópicos e permanentes da área, como parâmetros de solo (tipo, textura, condutividade elétrica), relevo, entre outros. A partir da determinação dessas UGDs, as práticas de manejo agrícolas podem ser adequadas para cada UGD de forma específica, considerando as características limitantes específicas de cada área.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um dos índices de vegetação mais utilizados na agricultura atualmente, por se relacionar diretamente com o teor e concentração de clorofila nas folhas e com a biomassa do dossel vegetativo da planta, sendo estimado pela reflectância do infravermelho próximo (NIR) e vermelho (RED). A variação numérica do NDVI varia entre os valores de menos um (-1) a mais um (+1), onde zero representa a falta/ausência de vegetação, e valores próximos a +1 (0,8 – 0,9) indicam uma alta densidade vegetal (Nasa, 2000). O NDVI pode ser obtido de diferentes plataformas carregadas com diferentes sensores de vegetação. Dentre eles, destacamos os sensores proximais e as imagens de satélites, que visam obter dados de reflectância em tempo real dos vinhedos, e possibilitando que parâmetros de estado nutricional das plantas, de início de rebrote, desenvolvimento das plantas e estresses bióticos e abióticos possam ser correlacionados (Ammoniaci et al., 2021).

Neste contexto, a delimitação dessas UGDs torna-se uma etapa importante no gerenciamento da produção vitivinícola. Existem diferentes metodologias para determinar essas unidades de manejo, e, dessa forma, objetivou testar uma das metodologias de definição de UGDs, propondo encontrar condições avançadas do manejo dos vinhedos, uma vez que possibilitam o entendimento da microvariabilidade espacial do solo e de plantas, que possa auxiliar na redução dos custos de produção e aumento da competitividade do setor vitivinícola nacional.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em dois vinhedos da vinícola Casa Ângelo Fantin, localizado no município de Monte Belo do Sul (RS). O município está situado na região fisiográfica da Encosta Superior do Planalto, no nordeste do estado do Rio Grande do Sul, inserido na Serra Gaúcha, região característica da produção de vinhos do Brasil. O clima, de acordo com a metodologia de Köppen, apresenta classificação Cfb, que corresponde a um clima temperado úmido com verões amenos. A precipitação pluviométrica média anual é de 1.770 mm, com distribuição média superior a 100 mm (Tonietto et al., 2008). O experimento foi realizado com as variedades: Chardonnay e Merlot, cultivadas sob sistema de condução espaldeira e com 8 e 12 anos, respectivamente (Figura 1). Para a variedade Merlot, é empregada a poda de frutificação Cordão Esporonado, e para a variedade Chardonnay é utilizada a poda de frutificação Guyot duplo.

Para a definição das UGDs em cada um dos vinhedos, utilizou-se o NDVI como informações básicas para a delimitação. Para construir as UGDs, foram selecionados sete (7) mapas de NDVI das duas últimas safras (2020 e 2021), que foram selecionados em diferentes períodos do vinhedo e com diferentes estádios de desenvolvimento da videira (Figura 2), sendo as seguintes datas: (20/06/2020, 21/09/2020, 22/11/2020, 15/12/20, 31/08/21, 25/10/21, 04/11/21).

As informações de NDVI foram obtidas por meio de imagens de satélites com resolução espacial de 3 m

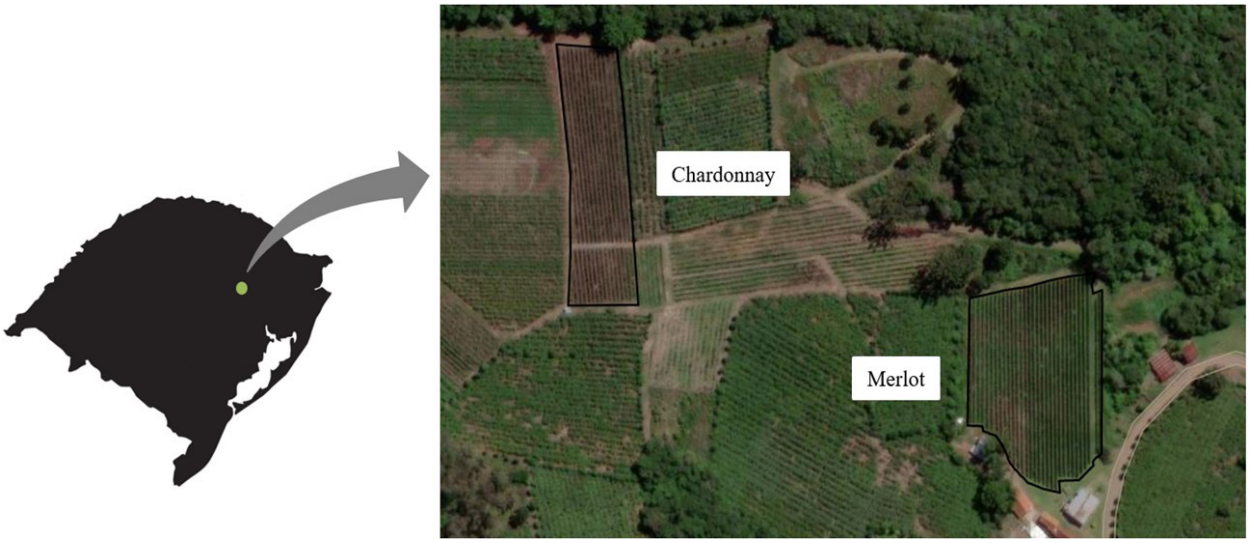


Figura 1. Localização das quadras de Merlot e Chardonnay utilizadas no experimento.

Dormência - 20/06/2020 e 31/08/2021		**Brotação - 21/09/2020**	
Floração - 22/11/2020, 25/10/2021 e 01/11/2021		**Maturação - 15/12/2020**	

Figura 2. Relações dos períodos utilizados para obtenção dos mapas de NDVI e o período fenológico da videira. Fonte: Google Imagens.

x 3 m. As imagens foram obtidas pelos satélites da Constelação Planet, composta por 150 satélites, oferecendo quatro bandas multiespectrais: Vermelho, Verde, Azul (RGB) e infravermelho. Para o processamento das imagens, definição e construção das UGDs, utilizou-se a plataforma Auravant®. Através do algoritmo usado pela plataforma, foi mensurado o NDVI médio de cada pixel ($9m^2$), para obter a variabilidade espacial do mapa e posteriormente realizar a interpolação e determinação das unidades de gestão.

Com o auxílio do aplicativo móvel da plataforma Auravant® do smartphone, foram distribuídos cinco pontos amostrais dentro dos limites de cada UGD, compostos por uma planta georreferenciada e mais cinco plantas selecionadas ao seu redor para compor as subamostras do ponto amostral. Dessa forma, em cada quadra, foram demarcados 15 pontos amostrais, totalizando 30 pontos no experimento. As quadra des "Chardonnay" e "Merlot" possuem 0,40 e 0,45 hectares, respectivamente.

As unidades de gestão propostas foram classificadas em baixo, médio e alto vigor, de acordo com o valor médio de NDVI para classificação. Considerando a variabilidade espacial existente, definiram-se diferentes UGDs para cada área, sendo os valores apresentados na tabela Tabela 1.

Tabela 1. Valores médios de NDVI utilizados para a classificação das unidades de gestão diferenciadas.

UGDs	Merlot	Chardonnay
Alto vigor	0,73 a 0,81	0,70 a 0,79
Médio vigor	0,65 a 0,72	0,61 a 0,69
Baixo vigor	0,55 a 0,64	0,51 a 0,60

Além disso, após a poda de inverno seguinte da safra 2022, foi calculado para cada ponto amostral da quadra de Merlot, o Índice de Ravaz, um indicativo para mensurar o nível de vigor em um vinhedo, que se caracteriza por ser uma relação da produção de frutos por planta (kg) sobre o peso do material podado (kg). Esse índice é utilizado para determinar o equilíbrio e o vigor das plantas.

Apenas na safra 2022 foi possível realizar a colheita das frutas e coletar análises de produção, obtendo-se produção em área total (kg ha^{-1}), produção por UGDs (Kg/ponto), cachos/planta e de qualidade do mosto da uva, analisando grau Brix°, Acidez Total e pH do mosto.

3 RESULTADOS

Nas Figuras 3 e 4, são apresentados os sete (7) mapas de NDVI utilizados para a construção das UGDs e seus respectivos histogramas. Esses mapas foram utilizados para a interpolação e construção das médias de definição das UGDs, no mapa final que estão definidas as três unidades onde foram distribuídos os pontos amostrais para coleta das análises de planta, solo e mosto da uva.

Observa-se nos mapas apresentados e seus respectivos histogramas, que existe uma variação do NDVI ao longo do ciclo da videira nas duas safras anteriores. Entretanto, salienta-se que os valores médios de NDVI foram obtidos em área total, não excluindo as entrelinhas do vinhedo, o que pode ter ocasionado alguma interferência na definição das UGDs. Por outro lado, sem a exclusão das entrelinhas pode não ser um problema, pois como ao longo da safra o vinhedo possui a cobertura vegetal de diferentes espécies de plantas de cobertura, essas plantas de cobertura também são responsáveis por expressarem a microvariabilidade espacial do vinhedo.

Pode-se observar que na quadra "Merlot" (Tabela 2) houve diferenças significativas na produção entre os ambientes de baixo e médio vigor, porém não houve diferença nas médias entre o ambiente de alto vigor em relação ao de baixo e médio vigor. Também não houve diferenças significativas entre esses dois ambientes, indicando que poderiam ser utilizadas somente duas UGDs em vez de três, como apresentado por Martinez-Casasnovas et al. (2012) em estudo

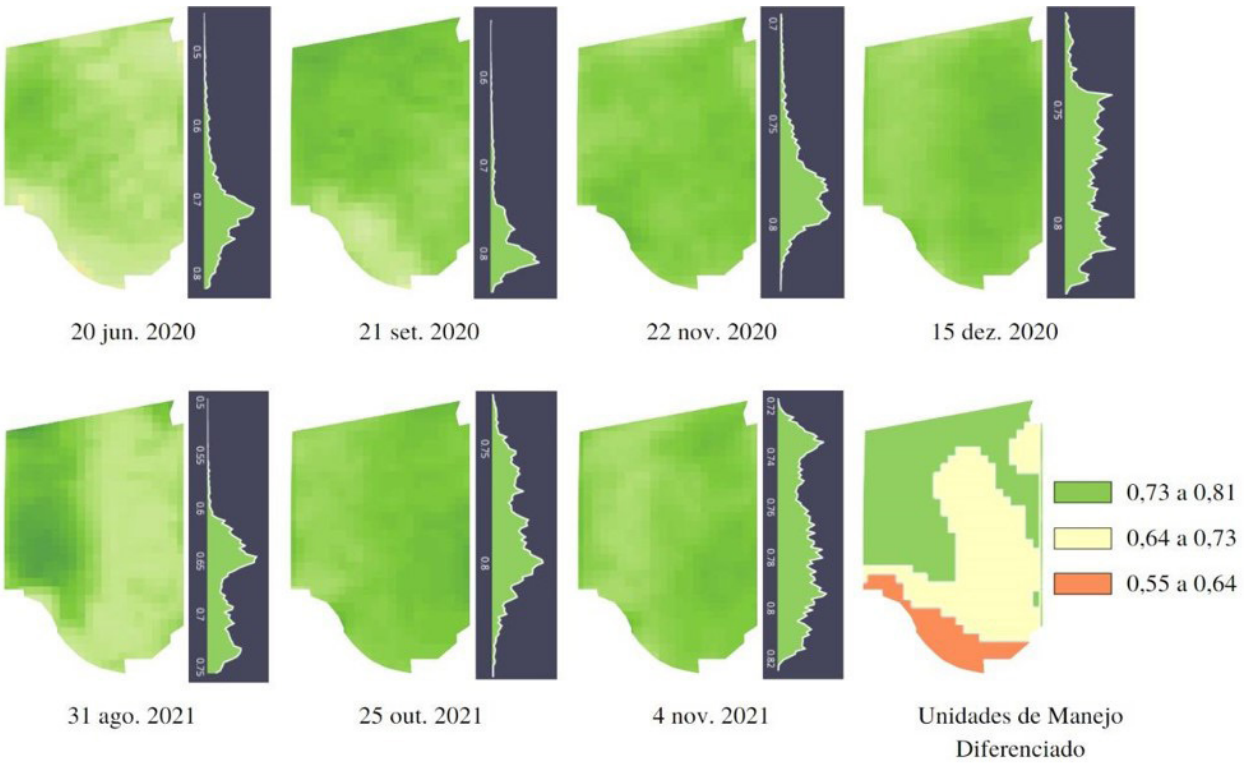


Figura 3. Os sete mapas de NDVI e seus respectivos histogramas ao longo do ciclo da videira e o mapa das UGDs segundo a classificação dos valores médios de NDVI da quadra de "Merlot".

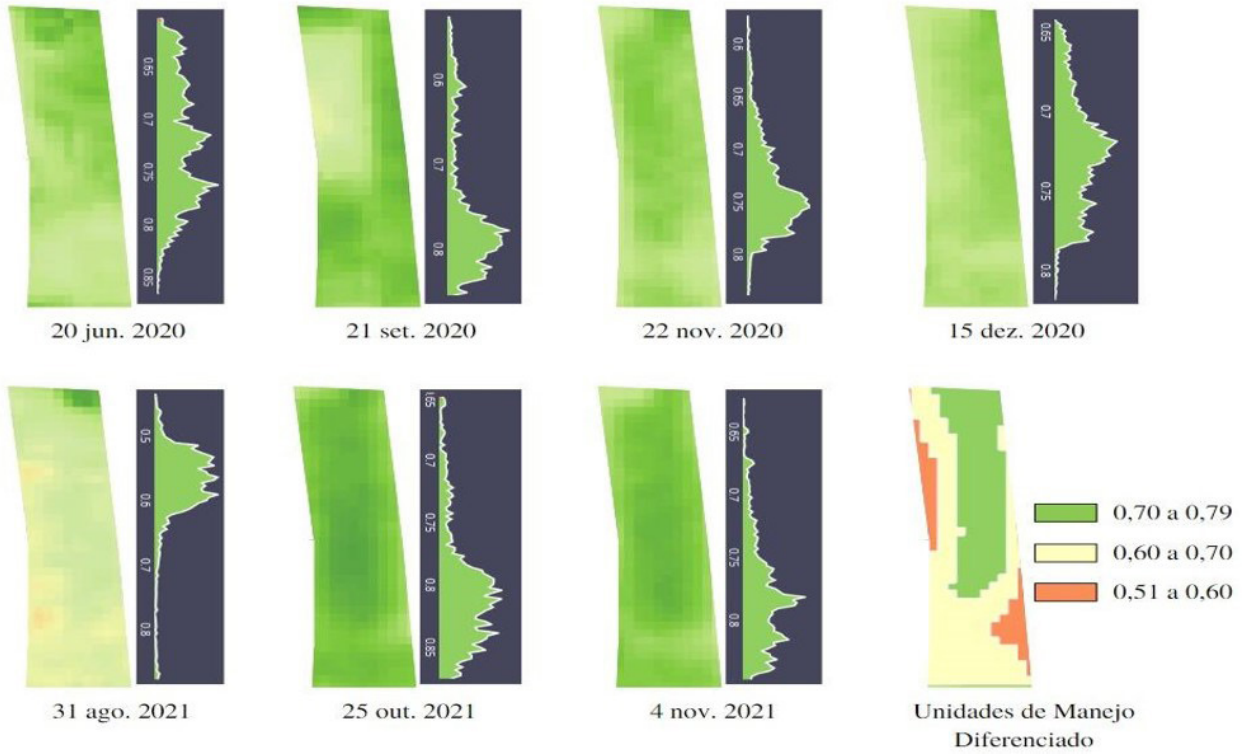


Figura 4. Os sete mapas de NDVI e seus respectivos histogramas ao longo do ciclo da videira e o mapa das UGDs segundo a classificação dos valores médios de NDVI da quadra de "Chardonnay".

Tabela 2. Resultado das análises de variância e do teste de comparação de médias para avaliar a produção (kg/ha), média de cachos/planta e variáveis de qualidade de mosto, sendo Brixo, Acidez total (AT) nos três ambientes de produção da quadra "Merlot".

	Merlot				
	Produção (kg/ha)	**Cachos/planta**	**Brixo**	**AT**	**pH**
AV	9353.3 ab	25,4	22,0	7.5 b	3,6
MV	8766.7 b	27,3	21,9	7.7 b	3,6
BV	10922.7 a	25,4	21,2	8.4 a	3,5
			ns		ns

*Probabilidade de erro ao afirmar que houve efeito do tratamento, segundo o teste F da análise de variância; ** Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas não diferem. Tukey 5%.

para analisar o potencial dos mapas NDVI na construção de unidades de manejo diferenciadas para colheita seletiva.

Não se verificou nas análises qualitativas do mosto da uva nenhuma diferença significativa quanto Brixº e pH do mosto nas três UGDs. Entretanto, a acidez total foi maior no ambiente de baixo vigor produtivo e menor nos ambientes de médio e alto vigor, o que pode ser justificado pela menor produção nesses dois ambientes e maior grau Brixº, que consequentemente propicia uma melhor qualidade da uva, em virtude da relação Brixº/AT do mosto que confere equilíbrio gustativo ao vinho (Guerra, 2002). Na quadra "Chardonnay" (Tabela 3), pode-se observar que houve diferenças significativas na produção entre a unidade de baixo vigor e de médio e alto vigor, a qual obteve uma produção maior em relação aos ambientes de médio e alto vigor, que novamente não apresentaram diferenças significativas em relação à produção, Brixº e pH. Observou-se nas análises qualitativas do mosto da uva diferença significativa quanto à acidez total, a qual foi maior nos ambientes de baixo e médio vigor, em relação ao ambiente de alto vigor, que apresentou menor AT, podendo ser justificado em função do maior grau Brixº (açúcar), que consequentemente diminui a AT (Guerra, 2002).

Os dados de produtividade nas duas áreas foram menores nos ambientes de alto e médio vigor, em comparação ao ambiente de baixo vigor. Isso pode ser explicado por um excesso de vigor nas plantas, já

Tabela 3. Análises de variância e do teste de comparação de médias para avaliar a produção (kg/ha), média de cachos/planta e variáveis de qualidade de mosto, sendo Brixo, Acidez total (AT) nos três ambientes de produção da quadra "Chardonnay".

	Chardonnay				
	Produção (kg/ha)	**Cacho/planta**	**Brixo**	**AT**	**pH**
AV	9033.3 b	33,2	22,0	6.8 b	3,6
MV	9073.3 b	35	21,4	7.4 a	3,5
BV	9793.3 a	18,9	21,8	7.4 a	3,5
			ns		ns

*Probabilidade de erro ao afirmar que houve efeito do tratamento, segundo o teste F da análise de variância; ** Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas colunas não diferem. Tukey 5%.

que nesses ambientes os valores de NDVI são maiores, indicando maior biomassa vegetal e possivelmente maiores teores de N nas folhas, que promove o maior crescimento vegetativo, reduzindo as flores fecundadas, aumentando a incidência de doenças fúngicas e diminuindo peso e tamanho dos cachos, com isso a produção de uva diminui (Brunetto, 2015).

Além disso, foram obtidos dados do peso de matéria seca retirada na poda da área cultivada com "Merlot", para a obtenção do Índice de Ravaz, que segundo Kliewer e Dokoozlian (2005) indica o equilíbrio entre a produção e o vigor das videiras e deve situar-se entre 4 e 10, onde valores menores que 4 caracterizam o excesso de vigor das videiras e/ou a baixa produção de uva. Os ambientes de alta e média produtividade tiveram como média 3,5 e 4, respectivamente, para o Índice de Ravaz, o que pode indicar baixa produção e excesso de ramos podados. O ambiente de baixa produção apresentou um valor médio de 5, indicando um equilíbrio da produção e vigor.

4 CONCLUSÃO

Os dados demonstram que as UGDs determinadas através da interpolação de mapas de NDVI de diferentes épocas do ciclo da cultura podem ser uma ferramenta utilizada para a delimitação de UGDs para a vitivinicultura, pois apresentoram relação com a produção e demonstraram a variabilidade espacial no vinhedo.

Sendo assim, os resultados preliminares desse experimento podem indicar novos caminhos para estudos futuros na AP para a vitivinicultura, de forma que ainda são necessários ajustes das ferramentas de AP para o setor vitivinícola.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa, à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia (PPGFITO), ao Grupo de Estudos em Agricultura Digital (GEAD), e à Casa Ângelo Fantin, pela disponibilidade em utilizar suas instalações e equipamentos, e à Vinícola Adega da Serra, pela disponibilidade de uso de seu laboratório de análises químicas.

REFERÊNCIAS

AMMONIACI, M.; KARTSIOTIS, S.; PERRIA, R.; STORCHI, P. State of the art of monitoring technologies and data processing for precision viticulture. **Agriculture**, v. 11, n. 3, p. 201, 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/agriculture11030201.

ARNÓ SATORRA, J.; MARTÍNEZ CASASNOVAS, J. A.; RIBES DASI, M.; ROSELL POLO, J. R. Review. Precision viticulture. Research topics, challenges and opportunities in-site-specific vineyard management. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 7, n. 4, p. 779, 2009. DOI: http://doi.org/10.5424/sjar/2009074-1092.

BRAMLEY, R.G.V; HAMILTON, R.P. Understanding variability in winegrape production systems: 1. Within vineyard variation in yield over several vintages. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. 10, p. 32-45, 2004. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2004.tb00006.x.

BRUNETTO, G., MELO, G.W.B.D., TOSELLI, M., QUARTIERI, M., TAGLIAVINI, M. The role of mineral nutrition on yields and fruit quality in grapevine, pear and apple. **Revista Bra-sileira de Fruticultura**, v. 37, 1089–1104, 2015. https://doi.org/10.1590/0100-2945-103/15

GUERRA, C. C. Maturação da uva e condução da vinificação para a elaboração de vinhos finos. In: SIMPÓSIO MINEIRO DE VITICULTURA E ENOLOGIA, Minas Gerais. **Anais** [...]. 2002. p. 179-192. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1054864/1/GuerraSMVEp179192.pdf. Acesso em: 26 abr. 2022.

KLIEWER, W. M.; DOKOOZLIAN, N. K. Leaf area/crop weight ratios of grapevines: influence on fruit composition and wine quality. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 56, n. 2, p. 170-181, 2005. ISSN 0002-9254.

MANN, K. K.; SCHUMANN, A. W.; OBREZA, T. A. Delineating productivity zones in a citrus grove using citrus pro-

duction, tree growth and temporally stable soil data. **Precision Agriculture**, v. 12, p. 457-472, 2010. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-010-9189-y.

MARTINEZ-CASASNOVAS, J. A.; AGELET-FERNANDEZ, J.; ARNO, J.; RAMOS, M. C. Analysis of vineyard differential management zones and relation to vine development, grape maturity and quality. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 2, p. 326–337, 2012. DOI: http://doi.org/10.5424/sjar/2012102-370-11.

MIELE, A.; FLORES, C. A.; FILIPPINI ALBA, J. M.; BADALOTTI, C. Efeito do tipo de solo nos compostos fenólicos e na atividade antioxidante do vinho. **Revista Brasileira de Viticultura e Enologia**, n. 6, p. 30-38, 2014. Disponível em: https://www.enologia.org.br/default/uploads/revista/revista-30.pdf?d312a75327476bda651 d52efe6647e94. Acesso em: 20 out. 2021

Nasa. **Measuring Vegetation (NDVI & EVI)**: normalized difference vegetation index (ndvi). 2000. Disponível em: https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation/measuring_vegetation_2.php. Acesso em: 19 jun. 2020.

TONIETTO J., GUERRA C. C., MANDELLI F., SILVA G., MELLO L. M. R., ZANUS M. C., HOFF R. Monte Belo: Características da Identidade Regional para uma Indicação Geográfica de Vinhos. Bento Gonçalves-RS: Embrapa, Comunicado técnico 86, 2008.

65

Comparação entre imagens orbitais Sentinel-2 e Planet para caracterização espacial e temporal de vinhedo por NDVI

Comparison between Sentinel-2 and Planet orbital images for spatial and temporal characterization of vineyards by NDVI

Henrique Pauletto[1], Amanda Heemann Junges[2], Rosemary Hoff [3], Rodrigo Alberti[4]

[1] *Engenheiro Cartógrafo, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), Centro Politécnico, São Leopoldo (RS), Brasil, henriquepauletto_@live.com*

[2] *Doutora, Departamento de Diagnóstico e Pesquisa Agropecuária (DDPA/SEAPI), Veranópolis (RS), Brasil, amanda-junges@seapi.rs.gov.br*

[3] *Doutora, Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, rose.hoff@embrapa.br*

[4] *Mestre, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), Centro Politécnico, São Leopoldo (RS), Brasil, rodrigoalberti.geologia@hotmail.com*

RESUMO

Este estudo monitorou um vinhedo de Cabernet Sauvignon por meio de dados orbitais a partir das imagens dos satélites Planet e Sentinel-2, avaliando a adequabilidade dos dois sensores por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Doze imagens de cada satélite da safra 2017/2018 foram analisadas usando técnicas de processamento digital de imagens e sistema de informações geográficas. Foram gerados perfis temporais médios de NDVI, os quais foram analisados por métodos estatísticos. Foram elaborados mapas de zoneamento para cada cena ao longo do período estudado, para ambas as imagens de satélite. Os resultados mostraram que os dois satélites são adequados para utilização no monitoramento dos vinhedos, devido à sua excelente resolução temporal, espacial e radiométrica.

Palavras-chave: viticultura de precisão; sensoriamento remoto; imagens multiespectrais.

ABSTRACT

This study monitored a Cabernet Sauvignon vineyard using orbital data from images from the Planet and Sentinel-2 satellites, evaluating the suitability of the two sensors using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Twelve images from each satellite from the 2017/2018 harvest were analyzed using digital image processing and geographic information system techniques. Average temporal profiles of NDVI were generated and analyzed using statistical methods. Zoning maps were created for each scene during the period studied, for both satellite images. The results showed that the two satellites are suitable for use in monitoring vineyards, due to their excellent temporal, spatial and radiometric resolution.

Keywords: precision viticulture; remote sensing; multispectral images.

1 INTRODUÇÃO

Os índices de vegetação têm sido eficientes na definição de padrões espaciais de vinhedos, apoiando previsão de safra, disponibilidade hídrica e detecção de doenças (Drissi et al., 2009; Johnson et al., 2003). Junges et al. (2017) definiram as características temporais do NDVI de imagens orbitais Landsat-8 em vinhedos cultivados no sistema de condução em espaldeira na região vitivinícola Campanha Gaúcha. Conforme Junges et al. (2017), a variabilidade temporal do NDVI mostrou o acúmulo de biomassa verde durante o ciclo vegetativo, bem como a variabilidade espacial entre vinhedos em diferentes locais, o que pode estar associado a diferenças de solo, condições climáticas e manejo agrícola.

No sistema de condução em espaldeira, o dossel vegetativo não é contínuo, ocasionando mistura de reflectância espectral captada pelas imagens de satélite, a qual pode ser gerada pela vegetação

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000038

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

da videira e da cobertura das entrelinhas, principalmente quando a imagem tem baixa resolução espacial. Isso influencia os valores médios do NDVI, podendo também ser devido aos efeitos climáticos no dia da cena da imagem e a alta biomassa verde, saturando o NDVI e mascarando a variabilidade da videira (Junges et al., 2017).

Este estudo teve como objetivo comparar imagens de média e alta resolução espacial no monitoramento espaço-temporal de um vinhedo pelo NDVI, a fim de avaliar quantitativa e qualitativamente a variabilidade desse índice em relação ao ciclo de desenvolvimento do vinhedo, visando apoiar a gestão do mesmo, de forma a verificar seu potencial no contexto da agricultura de precisão.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foi escolhido um vinhedo da variedade Cabernet Sauvignon com 6,5 hectares, cultivado no sistema de condução espaldeira, pertencente à Vinícola Almadén, Miolo Wine Group (Figura 1). As imagens escolhidas

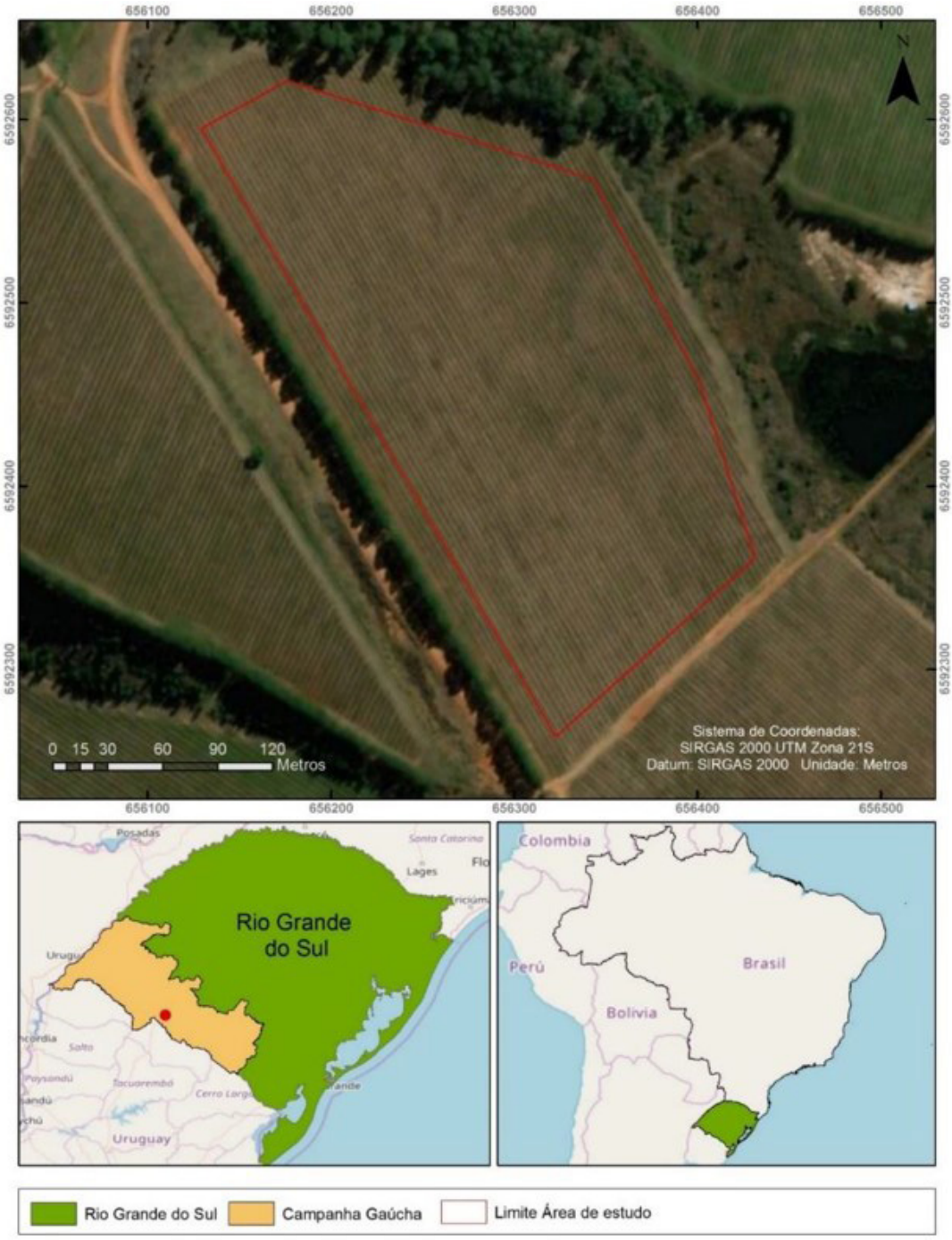


Figura 1. Localização da área de estudo, vinhedo de Cabernet Sauvignon em Santana do Livramento/RS, Brasil.

foram as dos satélites Sentinel-2 e Planet. As imagens do Sentinel-2 fazem parte do programa da Agência Espacial Europeia (European Space Agency, 2015) de uso público e as imagens Planet foram disponibilizadas pelo programa de educação e pesquisa Planet (Planet, 2019).

Foram selecionadas imagens com a mesma data de aquisição para ambos os satélites e, devido à diferença de resolução temporal entre eles, foi feito um levantamento de todas as imagens do Sentinel-2 entre outubro de 2017 e julho de 2018 sem nuvens. Esse período permitiu o acompanhamento do ciclo vegetativo do vinhedo, coincidindo com as práticas de gestão efetuadas pela vinícola, ou seja, primavera, verão e outono, exceto inverno.

De acordo com as datas das imagens do Sentinel-2, foram selecionadas imagens Planet com a mesma data, para comparação de imagens NDVI geradas a partir dos dois satélites. Mesmo tendo uma frequência diária, em algumas datas não foi possível obter imagens Planet, ocorrendo poucas falhas ao longo do período de estudo. Mesmo assim, a investigação possibilitou o acompanhamento do ciclo vegetativo desde o desenvolvimento das folhas, floração e frutos até o período de dormência, ou seja, a fase do ciclo em que a videira não possui mais folhas.

O NDVI foi desenvolvido por Rouse et al. (1974), sendo calculado a partir da reflectância da vegetação da luz com comprimento de ondas eletromagnéticas na faixa do vermelho e do infravermelho próximo refletido pela vegetação, conforme a Expressão 1:

$$NDVI = (NIR - Vermelho)/(NIR + Vermelho) \quad (1)$$

onde:
NIR é a reflectância na faixa do infravermelho próximo e vermelho é a reflectância na faixa do vermelho.

Foram aplicadas correções radiométricas, geométricas e atmosféricas às imagens, a fim de melhorar o processamento digital, sendo que as imagens de ambos os sensores apresentaram diferenças de resoluções espacial, espectral e radiométrica (Pauletto et al., 2022).

As imagens Planet foram corrigidas pelo Ortho Scene Product – ferramenta Analytic, uma correção atmosférica e a segunda simulação de um sinal de satélite no espectro solar (6S) – reflectância de superfície. Para a imagem Sentinel, foi utilizado o método Dark Object Subtraction – DOS 1 (Chavez Junior, 1988). Essa correção considerou apenas os valores dos números digitais (ND), não necessitando dos valores dos efeitos atmosféricos na data da cena (Congedo, 2016; Weiss et al., 2015). O Semi Automatic Classification Plugin (SCP), módulo do software QGIS, foi utilizado para correção atmosférica das imagens Sentinel.

O NDVI de ambas as imagens foi gerado no software QGIS 3.14 (QGIS, 2020), após recorte e reprojeção para o sistema de coordenadas UTM Sirgas 2000 - 21S. As imagens do NDVI Sentinel-2 foram reamostradas de 10 para 3 m, a fim de equalizar com as imagens Planet e para facilitar a comparação das duas imagens. Foi utilizado o método de interpolação por vizinho mais próximo, minimizando a distorção na imagem e evitando alteração nos valores do número digital (ND) de cada pixel.

Foi feita a análise da estatística descritiva do NDVI, obtendo-se medidas de tendência central (média, mediana e moda), dispersão, desvio padrão, coeficiente de variação e variância. Cada pixel tornou-se um ponto, tendo as coordenadas z-value (NDVI), leste (E) e norte (N) da imagem. Os dados foram processados por meio do software estatístico SPSS.

O NDVI foi analisado por valores médios no perfil temporal do período estudado, visando investigar a variabilidade espaço-temporal da parcela (Pauletto et al., 2022). Histogramas e boxplots foram feitos para interpretação do comportamento dos dados (Andriotti, 2005; Campos, 2003). As curvas de distribuição normal foram geradas no software SPSS, e uma análise mais detalhada foi realizada pela aplicação de testes estatísticos para avaliar a diferença entre as imagens, sobre o valor médio do NDVI em cada data.

Foram geradas imagens de diferença e zonas de NDVI para cada data, sendo aplicada subtração da imagem NDVI Planet pela imagem NDVI Sentinel-2. Isso resultou em valores numéricos reais de diferença de NDVI, possibilitando a identificação e zoneamento e mostrando quais valores de cada imagem foram mais proeminentes na área de estudo. A classificação das imagens resultantes gerou três classes: 1) NDVI Planet e Sentinel-2 iguais; 2) NDVI Planet maior; 3) NDVI Sentinel-2 maior.

Os mapas de zoneamento do NDVI ficaram no limite definido como ± 1 de desvio padrão (SD) da média do NDVI de cada cena. Segundo Molin et al. (2015), a definição de limites poderia identificar valores anômalos em um conjunto de dados. Para definir esses limites, além da média, também foram utilizadas medianas, considerando um (corte extremo) ou mais (corte conservador), desvios padrão (Molin et al., 2015). Para gerar os mapas, foram definidos limites para cada data para as três classes, mostrando a variabilidade do vinhedo: 1) valores inferiores à média do NDVI - 1SD (classe 1); 2) valores dentro da média do NDVI (classe 2); 3) valores acima da média do NDVI + 1SD (classe 3).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variação do NDVI poderia estar associada a uma mistura espectral em vinhedos cultivados no sistema de condução em espaldeira, onde há crescimento da cobertura vegetal nas entrelinhas e perda de folhas. Assim, há uma maior mistura entre reflectância da vegetação de cobertura e planta de videira do que em outros períodos (Junges et al., 2017). A avaliação dos dados estatísticos em conjunto com os produtos gráficos mostrou que a reamostragem da imagem Sentinel-2 para 3 m de resolução espacial não apresentou distorções significativas nos valores de média, mediana, desvio padrão e variância do NDVI (Figura 2).

Essas variações podem ser causadas devido aos limites do vinhedo, onde há diferentes usos do solo e, como essa média aritmética pode variar de acordo com os valores extremos (mínimo e máximo), a mediana não varia (Andriotti, 2005). Assim, mesmo havendo diferenças nos valores mínimo e máximo, os valores centrais do conjunto não apresentaram diferenças (Pauletto et al., 2022). Ducati et al. (2014) utilizaram o mesmo método de reamostragem para estudos em vinhedos e constataram que os valores médios não apresentaram diferenças significativas.

Os pontos extraídos das imagens NDVI do vinhedo formaram um conjunto de pixels (n = 7330). Cada imagem para cada data representou uma variável, 12 para imagens Planet e 12 para imagens Sentinel-2. Para cada imagem, foram calculadas estatísticas descritivas de tendência central e os valores mínimo e máximo de NDVI. Valores positivos de NDVI indicariam a biomassa verde no vinhedo (Junges et al., 2017). A Figura 3 mostra a variação da média do NDVI no período analisado.

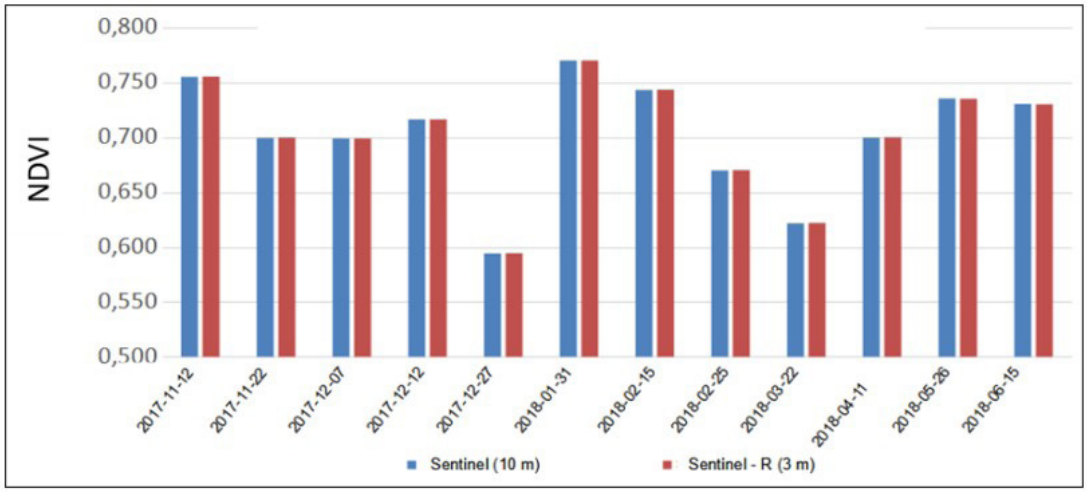


Figura 2. Perfil temporal da média do NDVI das imagens originais e reamostradas do Sentinel-2, vinhedo Cabernet Sauvignon, Santana do Livramento/RS, Brasil (Pauletto et al., 2022).

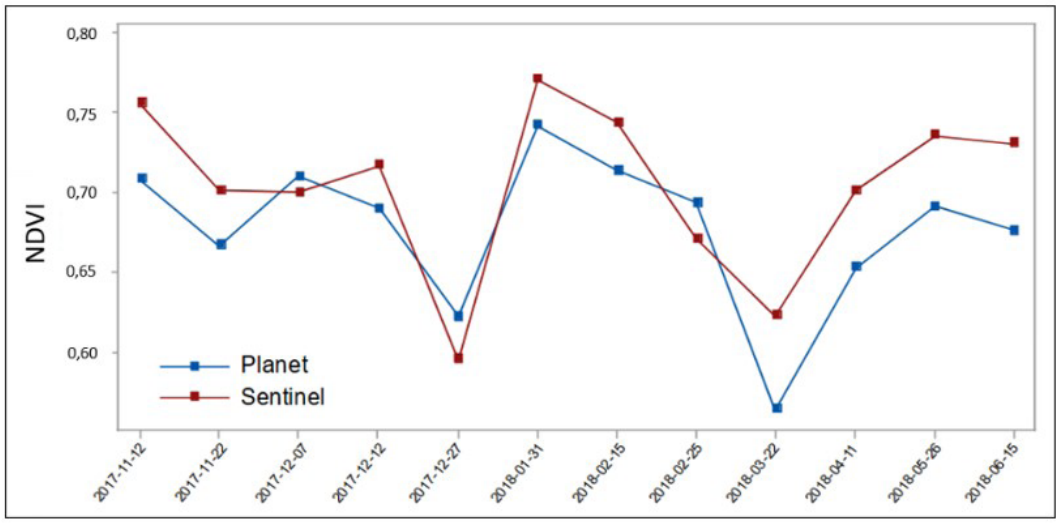


Figura 3. Perfil temporal da média do NDVI das imagens Sentinel-2 e Planet de um vinhedo Cabernet Sauvignon, Santana do Livramento/RS, Brasil (Pauletto et al., 2022).

Os maiores valores médios de NDVI foram em 31/1/2018, iguais para ambos os satélites. Os valores mais baixos foram diferentes, mas os valores médios foram semelhantes. Mesmo com diferenças qualitativas nos valores médios de NDVI entre as imagens Planet e Sentinel-2 na data do menor valor, entende-se que não houve discrepância em termos de valores absolutos entre as imagens, com diferenças inferiores a 0,10.

Em 12 imagens, apenas em 7/12/2017, os valores médios do NDVI foram considerados iguais a partir da análise da média em valor absoluto. Para ser igual, a diferença foi considerada menor ou igual a ± 0,01. Nas demais datas, os valores médios do NDVI apresentaram maior diferença, variando de -0,03 a 0,06. Diferenças inferiores a 0,10 foram consideradas não discrepantes. Essas diferenças foram analisadas na forma de perfis temporais de NDVI médio e imagens de diferença. A variação do NDVI entre as imagens ocorreu na fase de desenvolvimento vegetativo, de 12/11/2017, período de crescimento e desenvolvimento das folhas, expansão da área no dossel vegetativo e um crescimento de vegetação cobrindo as linhas entre as videiras no valor médio de pixel. A partir de 22/3/2018, ocorreu a fase final do ciclo vegetativo, senescência e queda de folhas, diminuindo as atividades de manejo do vinhedo.

Em 27/12/2017 e 25/2/2018, os valores médios de NDVI das imagens Planet foram superiores aos das imagens Sentinel-2. Nas demais datas, os valores médios de NDVI das imagens do Sentinel-2 foram maiores. Para estas datas em que a média do NDVI do Planet foi superior, dias antes das cenas citadas, foi realizada a roçada no vinhedo, com a retirada da vegetação nas entrelinhas das vinhas. Isso supõe que as imagens do Planet, devido à sua maior resolução espacial, apresentaram maior capacidade de definição de alvos e resposta mais detalhada da média do NDVI. Isto permitiu uma melhor identificação das alterações na vinha ao longo do ciclo, sendo que os valores mais elevados poderão ser provenientes da vegetação do vinhedo.

De acordo com Matese et al. (2015), vinhedos em sistema de espaldeira são altamente heterogéneos, onde os valores de NDVI mais elevados se referem à copa vegetativa do vinhedo, e os mais baixos, à vegetação nas entrelinhas, confirmando assim o resultado ora descrito. No entanto, entende-se que as maiores alterações de NDVI das imagens podem estar associadas a distorções radiométricas e geométricas dessas e que podem afetar o valor de NDVI. A imagem de 31/1/2018 foi o pico da média do NDVI do período analisado (0,770 para Sentinel-2 e 0,741 para Planet), 35 dias após o último valor de NDVI obtido se houvesse apenas um corte mecanizado na entrelinha do vinhedo. Assim, o alto valor do NDVI pode ser devido à mistura dos valores de toda a vegetação da parcela.

A análise dos resultados pelo coeficiente de variação (CV) considerou que valores de CV abaixo de 40% representariam a homogeneidade do conjunto amostral (Andriotti, 2005). O maior CV encontrado foi de 8,85% na imagem Sentinel-2 de 25/2/2018. No entanto, os vinhedos em condução espaldeira são heterogêneos, divergindo da análise de CV. Spiegel (1994) e Andriotti (2005) apontaram que o CV pode ser pouco útil quando os valores médios estão próximos de zero, como no caso estudado, o que limita a avaliação da heterogeneidade. De acordo com Pringle et al. (2003), embora as análises descritivas permitam a explicação da estrutura espacial, ou irregularidades, não conseguem descrever a heterogeneidade espacial da cena.

O teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov, com nível de significância de $p < 0,05$, mostrou resultados à anormalidade do conjunto, uma vez que os valores de significância são todos inferiores ao limite definido. Assim, rejeita-se a hipótese nula, significando que os dados não apresentaram distribuição normal, confirmando os resultados dos histogramas e os valores de assimetria e curtose calculados na estatística descritiva.

Os valores médios máximos de NDVI ocorreram durante o período de desenvolvimento vegetativo, refletindo o acúmulo de biomassa verde na copa vegetativa, resultado também encontrado por Junges et al. (2017, 2019a, 2019b) no mesmo vinhedo. Assim, a variabilidade temporal pode ser influenciada por essa vegetação, seja ela espontânea ou de espécies cultivadas. No entanto, as datas em que os valores médios do NDVI diminuíram significativamente correspondem ao período de desenvolvimento vegetativo, entre 27/12/2017 e 22/3/2018.

Observou-se uma diminuição nos valores de NDVI em dezembro, possivelmente devido ao manejo agrícola nos dias que antecederam a imagem de 27/12/2017, quando foram retiradas as folhas, bem como a vegetação nas entrelinhas das videiras. Assim, a massa verde foi reduzida, sendo intensificada nos dias que antecederam a vindima das uvas (13 e 14 de março de 2018). Durante o período de senescência, com queda de folhas, os valores médios de NDVI apresentaram aumento, devido ao desenvolvimento da vegetação de cobertura, e os valores de NDVI aumentaram. Para ambas as imagens, Sentinel-2 e Planet, o perfil médio mostrou-se adequado, apresentando comportamento característico do vinhedo (Figura 4).

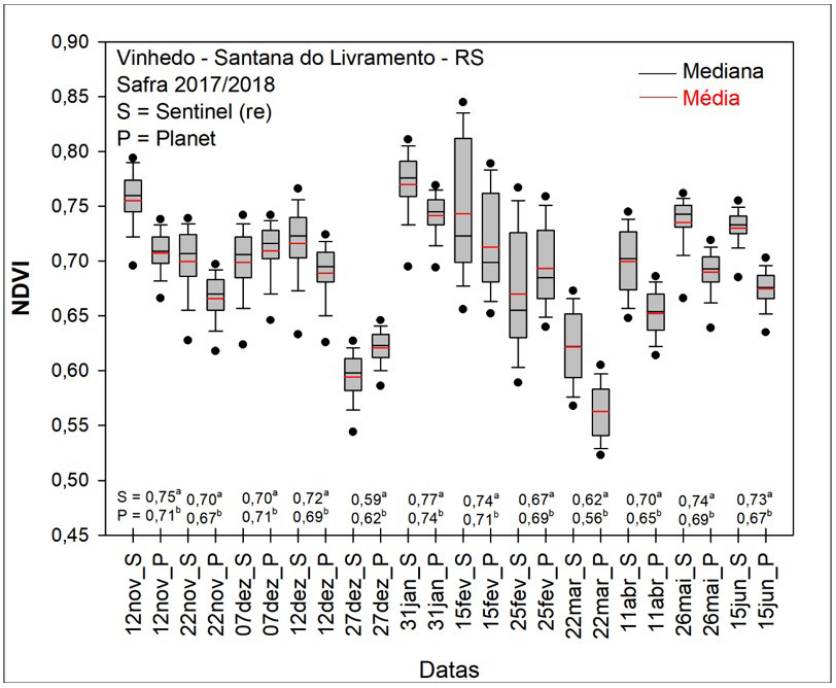


Figura 4. BoxPlots representando o perfil médio do NDVI, mediana, quartis, desvios padrão da média e outliers das imagens Planet e Sentinel-2, vinhedo Cabernet Sauvignon, Santana do Livramento/RS, Brasil (Pauletto et al., 2022).

As diferenças de valores médios do NDVI das imagens Planet e Sentinel-2 foram observadas também pela aplicação do teste de Mann-Whitney, utilizado para a comparação de dois conjuntos de dados que não seguem uma distribuição normal. Os resultados obtidos a partir da aplicação de Mann-Whitney (Tabela 1) mostraram que os valores médios não são iguais, devido aos valores de significância (Asymp. Sig. (coluna bicaudal)) serem inferiores a 0,05 (Field, 2009).

A diferença de classificação do NDVI para as imagens do Sentinel-2 e do Planet foram os valores negativos (-1; -0,01) que indicaram que os valores do Planet foram maiores do que os do Sentinel-2 (Classe 1). Valores positivos (0,01; 1) indicaram que os valores do Sentinel-2 foram maiores do que os do Planet (classe 3). Valores entre -0,0100 e 0,0100 referem-se a um NDVI igual das duas imagens (classe 2), conforme a Tabela 2.

Na data de 12/11/2017, 97,41% da área total (6,42 hectares) foram representados pelos valores originais do Sentinel-2, 0,82% igual às imagens e 1,77% à imagem do Planet. Na imagem de 22/11/2017, 91,7% dos valores vieram da imagem Sentinel-2 e apenas 2,88% vieram da imagem do Planet, enquanto 5,42% são coincidentes das duas imagens. Na data de 7/12/2017, os valores das imagens Sentinel-2 são os de menor proporção, apenas 10,79%, enquanto 50,98% dos valores de NDVI da cena são das imagens do Planet e 38,23% iguais.

As imagens de diferença de NDVI mostraram maior homogeneidade na primavera, nas áreas onde o valor de NDVI é maior na imagem Sentinel-2. Enquanto, para a imagem da primeira quinzena de dezembro, os valores do NDVI Planet são mais heterogêneos. Isso pode estar associado ao manejo no vinhedo de 24/11/2017 a 7/12/2017, sugerindo que com a vegetação reduzida, as variações na biomassa tornam-se mais perceptíveis na imagem.

Durante o desenvolvimento vegetativo no verão, em duas datas os valores do NDVI Sentinel-2 representaram mais de 80% do vinhedo (31/1/2018 e 15/2/2018). Na data de 27/12/2018, 84,46% do vinhedo são representados pela imagem Planet, 13,72% dos valores são iguais e apenas 1,82% do vinhedo é representado pela imagem Sentinel-2. Valores mais altos de NDVI da imagem do Planet podem estar associados às práticas de manejo agrícola. Para a data 25/2/2018, os maiores valores de NDVI na vinha referem-se à imagem Planet e a menor área para as imagens Sentinel-2, destacando a homogeneidade desses valores a oeste do vinhedo.

As imagens de outono não mostraram diferenças entre as datas, diferente do que ocorreu na primavera e verão. Os valores de NDVI das imagens Sentinel-2 abrangeram mais de 95% da área do vinhedo, com grande similaridade, o que pode estar relacionado ao período pós-colheita, senescência, perda de folhas e desenvolvimento da vegetação nas entrelinhas das videiras. Assim, a vegetação teve uma distribuição mais

Tabela 1. Resultados do teste Mann-Whitney das imagens Sentinel-2 e Planet, de um vinhedo Cabernet Sauvignon, Santana do Livramento/RS, Brasil (Pauletto et al., 2022).

Data da passagem	n	Mann-Whitney U	Wilcoxon W	Z	Asymp. Sig. (2-tailed)
12/11/2017	7330	4,40E+06	3,13E+07	-87,668	0,000
22/11/2017	7330	8,84E+06	3,57E+07	-70,371	0,000
07/12/2017	7330	2,09E+07	4,78E+07	-23,190	0,000
12/12/2017	7330	1,22E+07	3,91E+07	-57,120	0,000
27/12/2017	7330	9,10E+06	3,60E+07	-69,340	0,000
31/01/2018	7330	9,39E+06	3,63E+07	-68,226	0,000
15/02/2018	7330	1,83E+07	4,51E+07	-33,561	0,000
25/02/2018	7330	1,88E+07	4,56E+07	-31,629	0,000
27/12/2017	7330	5,25E+06	3,21E+07	-84,380	0,000
31/01/2018	7330	6,56E+06	3,34E+07	-79,247	0,000
15/02/2018	7330	4,60E+06	3,15E+07	-86,894	0,000
25/02/2018	7330	2,37E+06	2,92E+07	-95,629	0,000

Tabela 2. Áreas de classe, absolutas e relativas, resultando de imagens de diferença ao longo das estações analisadas, para imagens Sentinel-2 e Planet, de um vinhedo Cabernet Sauvignon, Santana do Livramento/RS, Brasil (Pauletto et al., 2022).

Data da passagem	Maiores valores NDVI Sentinel-2		Valores iguais NDVI Sentinel-2 e Planet		Maiores valores NDVI Planet	
	Area (ha)	Area (%)	Area (ha)	Area (%)	Area (ha)	Area (%)
Primavera						
12/11/2017	6,4233	97,41	0,0540	0,82	0,1170	1,77
22/11/2017	6,0469	91,70	0,3574	5,42	0,1900	2,88
07/12/2017	0,7113	10,79	2,5211	38,23	3,3620	50,98
12/12/2017	5,3910	81,73	0,7641	11,58	0,4410	6,69
Verão						
27/12/2017	0,1198	1,82	0,9049	13,72	5,5688	84,46
31/01/2018	5,7588	87,33	0,5582	8,47	0,2773	4,21
15/02/2018	5,3784	81,54	1,0053	15,24	0,2124	3,22
25/02/2018	0,8392	12,73	1,2596	19,10	4,4956	68,17
Outono						
27/12/2017	6,5214	98,89	0,0531	0,81	0,0198	0,30
31/01/2018	6,4161	97,30	0,1243	1,88	0,0540	0,82
15/02/2018	6,3531	96,34	0,1324	2,01	0,1089	1,65
25/02/2018	6,4737	98,17	0,0630	0,96	0,0576	0,87

homogênea, o que foi comprovado pelas imagens de diferença, devido à imagem do Sentinel-2 ter menor resolução espacial e os pixels cobrirem maiores áreas no vinhedo. Isso refletiu uma mistura dos valores dos diferentes tipos de cobertura vegetal, apresentando menor variabilidade na imagem.

Para identificar a variabilidade espacial dentro do vinhedo, as imagens de zoneamento NDVI foram definidas a partir da média ± 1 DP, mostrando uma estreita relação entre ambas as imagens da mesma data. Foram identificados padrões, como na porção nordeste do vinhedo, de valores de NDVI referentes à classe

Figura 5. Zoneamento dos valores médios do NDVI ± 1SD. Imagens P = Planet e S = Sentinel-2, vinhedo Cabernet Sauvignon, Santana do Livramento/RS, Brasil (Pauletto et al., 2022).

1. Entretanto, no restante do vinhedo, a variabilidade espaço-temporal dos valores de NDVI apresentou grande variação entre as classes. A Figura 5 mostra exemplos do período de fevereiro a abril de 2018, quando ocorreu a colheita e pós-colheita no vinhedo.

Avaliando a área de cada classe em valores relativos, sete imagens registraram menos de 1% de diferença entre Sentinel-2 e Planet para a classe 1. Para as classes 2 e 3, quatro imagens representam essa mesma diferença. A classe 1 apresentou menor diferença de área, enquanto nas classes 2 e 3 a diferença foi maior. Em apenas uma data, houve diferença de mais de 5% da área entre imagens. A partir de 15/2/2018, foi identificada uma segmentação dos valores de NDVI, que também foi percebida nos histogramas e nas imagens de diferença. Na porção leste do vinhedo, existe uma faixa SE-NW, onde os valores de NDVI foram incluídos na classe 3, permanecendo esse padrão em 25/2/2018.

Nas datas de 22/3/2018 e 11/4/2018, verificou-se uma inversão das classes 1 e 3 na parte leste e oeste do vinhedo, não tendo sido observadas outras anomalias nas restantes datas. Exceto em 11/12/2017, na porção oeste da parcela, foram apresentados valores da classe 3, ficando a porção leste com valores dentro dos limites definidos.

Os maiores valores de NDVI tenderam a se localizar na parte oeste do vinhedo, onde tem-se maior altitude, enquanto que na porção leste, com menor elevação e a umidade do solo, os valores de NDVI foram menores.

A definição de zonas maiores e menores que o desvio padrão possibilitou uma interpretação quantitativa e comparativa da variabilidade espacial do NDVI das imagens Sentinel-2 e Planet. Essa técnica permitiria ao produtor identificar áreas com diferentes necessidades de manejo agrícola, fato observado por Drissi et al. (2009) e Sun et al. (2017) em vinhedos, sobre a importância da caracterização espacial por NDVI.

4 CONCLUSÃO

Esses resultados correspondem aos primeiros estudos sobre a comparação de imagens Planet e Sentinel-2 no monitoramento de vinhedos na Indicação de Origem Campanha Gaúcha, Brasil. Isso contribui para o aumento do uso de imagens Planet, por um período maior, mais de um ciclo, ou uma região maior, mais de um vinhedo ou vinhedos de diferentes cultivares. O uso de imagens detalhadas pode gerar maiores informações sobre um vinhedo ou uma fazenda, para

verificar a diversidade entre as áreas, bem como para verificar padrões observados nas imagens para cada manejo aplicado.

As imagens de diferença mostraram uma predominância de maiores valores de NDVI nas imagens do Sentinel-2, confirmados pelos perfis médios de NDVI, sendo uma forma simples de espacializar as diferenças de NDVI, identificando áreas onde ocorreram as maiores variações entre as imagens. A identificação dessas áreas, a partir da média ± 1DP, foi importante para a visualização de áreas de maior ou menor desenvolvimento da vegetação. Poderia auxiliar na tomada de decisão e mesmo colheitas direcionadas para a produção de diferentes vinhos de um mesmo vinhedo.

Embora os valores médios tenham apresentado diferenças entre as imagens Sentinel-2 e Planet, o uso dessas deve ser individual, pois os valores médios do NDVI não foram semelhantes entre as imagens, portanto não é recomendada a junção dos perfis para suprir a falta de imagens. As falhas de imagem em algumas épocas do ano podem ser devidas à falta de imagens ou cobertura de nuvens, dificultando o monitoramento dos vinhedos.

Mesmo com diferentes correções atmosféricas aplicadas às imagens do Sentinel-2 (original e reamostrada) e do Planet, estas mostraram muitas semelhanças da média do NDVI, caracterizando satisfatoriamente a evolução temporal do acúmulo de biomassa verde nos vinhedos. As imagens dos dois satélites foram adequadas para o monitoramento da variabilidade por zoneamento do NDVI, mostrando um comportamento semelhante na espacialização desse índice no vinhedo.

Embora tenham diferentes resoluções espaciais, ambas as imagens podem auxiliar no zoneamento do vinhedo, mostrando sua variabilidade, no contexto da agricultura de precisão. A escolha da imagem será de acordo com os recursos financeiros e o detalhe pretendido pelo produtor.

Os resultados evidenciaram a necessidade do uso de imagens orbitais na viticultura de precisão, contribuindo para o monitoramento temporal e espacial dos vinhedos durante o desenvolvimento do ciclo vegetativo. A utilização dessas ferramentas pode apoiar essa região de Indicação Geográfica, como a monitorização de vinhedos isolados ou conjunto de vinhedos de uma vinícola ou associação de produtores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à agência de fomento à pesquisa Finep, CNPq e Fapergs, bem como às instituições de Embrapa e Unisinos, bem como à Miolo Wine Group.

REFERÊNCIAS

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentals of statistics and geostatistics**. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2005. 166 p.

CAMPOS, M. S. **Unraveling MINITAB**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2003. 261 p.

CHAVEZ JUNIOR, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, n. 3, p. 459-479, 1988. DOI: http://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3.

CONGEDO, L. **Semi-automatic classification plugin documentation**. 2016. Disponível em: https://www.academia.edu/35886696/Semi_Automatic_Classification_Plugin_Documentation_Release_6_0_1_1. Acesso em: 4 abr. 2020.

DRISSI, R.; GOUTOULY, J. P.; FORGET, D; GAUDILLERE, J. P. Nondestructive measurament of grapevine leaf area by ground normalized difference vegetation index. **Agronomy Journal Spatial Variability**, v. 101, n. 1, p. 226-231, 2009. Disponível em: https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/agronj2007.0167. Acesso em: 4 abr. 2020.

DUCATI, J. R.; BOMBASSARO, M. G.; FACHEL, J. M. G. Classifying vineyards from satellite images: a case study on Burgundy's Côte d'Or. **OENO One**, v. 48, n. 4, p. 247-260, 2014. DOI: http://doi.org/10.20870/oeno-one.2014.48.4.1693.

EUROPEAN SPACE AGENCY. **Sentinel-2 User Handbook**. 2015. Disponível em: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/document-library/-/asset_publisher/xlslt4309D5h/content/sentinel-2-user-handbook. Acesso em: 4 abr. 2020.

FIELD, A. **Logistic regression:** discovering statistics using SPSS. Los Angeles: SAGE, 2009.

JOHNSON, L. F.; ROCZEN, D. E.; YOUKHANA, S. K.; NEMANI, R. R.; BOSCH, D. F. Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery. **Computer and Eletronics in Agriculture**, v. 38, n. 1, p. 33-44, 2003. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169902001060. Acesso em: 4 abr. 2020.

JUNGES, A. H.; FONTANA, D. C.; ANZANELLO, R.; BREMM, C. Normalized difference vegetation index obtained by ground-based remote sensing to characterize vine cycle in Rio Grande do Sul, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 5. p. 543-553, 2017. DOI: http://doi.org/10.1590/1413-70542017415049016.

JUNGES, A. H.; FONTANA, D. C.; LAMPUGNANI, C. S. Relationship between the normalized difference vegetation index and leaf area in vineyards. **Bragantia**. 78(2), 297-305, 2019b. DOI: http://doi.org/10.1590/1678-4499.2018168.

JUNGES, A. H.; PAULETTO, H.; HOFF, R.; DUCATI, J. R.; ALBERTI, R. Landsat images for vineyard monitoring in the "Campanha Gaúcha" region by temporal profile of NDVI. In: XIX BRAZILIAN SYMPOSIUM OF REMOTE SENSING. **Proceedings** [...]. Santos: INPE, 2019a.

Disponível em: http://marte2.sid.inpe.br/rep/sid.inpe.br/marte2/2019/10.25.15.14. Acesso em: 4 abr. 2020.

Matese, A.; Toscano, P.; Di Gennaro, S.F.; Genesio, L.; Vaccari, F.P.; Primicerio, J.; Belli, C.; Zaldei, A.; Bianconi, R.; Gioli, B. Intercomparison of UAV, **Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture**. Remote Sens. 2015, 7, 2971-2990. https://doi.org/10.3390/rs70302971. Acesso em: 4 abr. 2020.

MOLIN, P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 40 p. Disponível em: https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/precisao/livros/AGRICULTURA%20DE%20PRECISAO%20-%20OFICINA%20DE%20TEXTOS.pdf. Acesso em: 4 abr. 2020.

PAULETTO, H.; HOFF, R.; JUNGES, A. H.; ALBERTI, R; VALENTI, E. S. Orbital images for spatial and temporal characterization of vineyard by vegetation index in the "Campanha Gaúcha" wine region, Brazil. **Brazilian Journal of Agriculture** v. 97, n. 1, p. 86-116, 2022. DOI: http://doi.org/10.37856/bja.v97i1.4292.

PLANET. **Education and Research Program**. 2019. Disponível em: https://www.planet.com/markets/education-and-research/. Acesso em: 4 abr. 2020.

PRINGLE, M. J.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M.; TAYLOR, J. A. A preliminary approach to assessing the opportunity for site-specific crop management in a field, using yield monitor data. **Agricultural Systems**, v. 76, n. 1, p. 273-292, 2003. DOI: http://doi.org/10.1016/S0308-521X(02)00005-7.

QGIS. **Guia do Usuário QGIS**. 2020. Disponível em: https://docs.qgis.org/3.10/pt_BR/docs/user_manual/. Acesso em: 4 abr. 2020.

Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering, 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, In: S.C. Freden, E.P. Mercanti, and M. Becker (eds) **Third Earth Resources Technology Satellite–1 Symposium**. Volume I: Technical Presentations, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C., pp. 309-317. Disponível em: https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614. Acesso em: 12 abr. 2020.

SPIEGEL, M. R. **Statistic**. 3. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1994. 644 p.

Sun, L.; Gao, F.; Anderson, M.C.; Kustas, W.P.; Alsina, M.M.; Sanchez, L.; Sams, B.; McKee, L.; Dulaney, W.; White, W.; Alfieri, J.; Prueger, J.; Melton, F.; Post, K. Daily mapping of 30 m LAI and NDVI for grape yield prediction in California vineyards. **Remote Sensing,** v. 9, n. 4, p. 317, 2017. DOI: http://doi.org/10.3390/rs9040317.

WEISS, C. V. C.; CAMARGO, D. C. S.; ROSCA, E. H.; ESPINOZA, J. Comparative analysis between atmospheric correction methods in Landsat 8 Opertational Land Imager (OLI) sensor images. **Scientia Plena**, v. 11. n. 2, p. 1-8. 2015. Disponível em: https://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/17417. Acesso em: 4 abr. 2020.

66

Investigação dos teores de radioelementos (K, U e Th) e seu zoneamento no solo de vinhedos

Investigation of radioelement content (K, U and Th) and their zoning in vineyard soil

Rodrigo Alberti [1], Rosemary Hoff [2], Ricardo da Cunha Lopes[3], Henrique Pauletto[4]

[1] *Mestre, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), Centro Politécnico, São Leopoldo (RS), Brasil, rodrigoalberti.geologia@hotmail.com*

[2] *Doutora, Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, rose.hoff@embrapa.br*

[3] *Doutor, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), Centro Politécnico, São Leopoldo (RS), Brasil, ricardo.lopes@unisinos.br*

[4] *Engenheiro Cartógrafo, Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), Centro Politécnico, São Leopoldo (RS), Brasil, henriquepauletto_@live.com*

RESUMO

O método de espectrometria de raio gama é uma alternativa para medir rapidamente a intensidade da radiação emitida pelos elementos potássio (K), tório (Th) e urânio (U) na superfície do solo e isso pode apoiar outras análises de solo. Os altos conteúdos de K podem ser prejudiciais às videiras, fato que ocorre com frequência em regiões tropicais subtropicais. Além disso, a manutenção de teores desejáveis de matéria orgânica (MO) é difícil em solos arenosos. Esse tipo de solo ocorre em uma área vitícola localizada em Santana do Livramento, Brasil. Assim, foi avaliada a distribuição geográfica dos conteúdos de radioelementos em diferentes tipos de solo e relevo, bem como seu mapeamento dentro dos vinhedos. Utilizando um modelo digital de elevação (DEM) de imagem ALOS, os dados foram interpolados por krigagem, gerando mapas com resolução de cinco metros. Os mapas de conteúdo U, Th e K foram classificados em alto conteúdo, médio conteúdo e baixo conteúdo, bem como a altimetria foi classificada em níveis alto, médio e baixo, sendo ambos os aspectos em relação à área dos vinhedos. O zoneamento mostrou a espectrometria gama como uma alternativa rápida para medir a variabilidade espacial desses radioelementos, o que pode indicar quais vinhedos devem ser monitorados quanto aos teores de potássio e de MO no solo.

Palavras-chave: solo; espectrometria de raios gama; viticultura.

ABSTRACT

The gamma ray spectrometry method is an alternative to quickly measure the intensity of radiation emitted by potassium (K), thorium (Th) and uranium (U) on the soil surface, which can support other soil analyses. High soil K contents can be harmful to vines, a fact that frequently occurs in subtropical tropical regions. Besides, the maintenance of a desirable organic matter level (OM) is difficult in sandy soils. This type of soil occurs in viticultural area located in Santana do Livramento, Brazil. Thus, the geographic distribution of radioelement contents in different types of soil and relief was evaluated, as well as their mapping within the vineyards using the ALOS image digital elevation model. The data were interpolated by kriging, generating maps with a resolution of 5 meters. The U, Th and K content maps were classified into high content, medium content, and low content, as well as the altimetry was classified into high, medium and low levels both in relation to the vineyard area. Zoning showed gamma spectrometry as a quick alternative to measure spatial variations of these radioelements, which can indicate vineyards to be monitored for potassium and OM levels in soil.

Keywords: soil; gamma ray spectrometry; viticulture

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000039

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de geotecnologias na agricultura de precisão possibilitaria identificar a variabilidade espacial de determinados atributos em áreas cultivadas. Essa variabilidade pode estar associada a diferenças de relevo, vegetação, solo e ao manejo agrícola continuado (Bernardi et al., 2014). No desenvolvimento do solo, os processos de lixiviação e concentração de elementos em diferentes porções de um perfil de solo podem levar à ocorrência de diferentes nutrientes para as plantas cultivadas. O excesso de potássio tem sido identificado como um problema para a produção de suco de uva e vinho em áreas tropicais (Kodur, 2011), influenciando na acidez do produto, o que pode torná-lo de baixa qualidade em relação aos consumidores. Nas áreas com solo arenoso e lixiviado, e com agricultura convencional, como em partes da Campanha Gaúcha, pode ter havido profundas alterações, que podem causar, entre outras coisas, a perda de matéria orgânica (MO) (Sena et al., 2017). O mapeamento da variabilidade espacial desses aspectos pode subsidiar o manejo agrícola, seja pela inferência do teor de potássio do solo pela presença do radioelemento K, seja pela inferência da presença de MO em função da presença dos radioelementos U e Th.

Segundo Dickson e Scott (1997), o fato de o solo cobrir a superfície terrestre torna a relação entre os radioelementos da cobertura superficial e da rocha subjacente muito importante em levantamentos geofísicos. Assim, o método não invasivo de gamaespectrometria foi aplicado para distinguir radioelementos da superfície do solo numa área de vinhedos da Vinícola Almadén, Miolo Wine Group, na Região Vitivinícola da Campanha, Santana do Livramento, Rio Grande do Sul, Brasil. No caso da área estudada, os solos são oriundos de arenitos pobres em elementos radioativos, podendo apresentar diferentes efeitos devido à contaminação do material transportado (Dickson; Scott, 1997). Isto foi mostrado por estudos anteriores, em valores maiores em relação à rocha subjacente, embora os efeitos de intercalação com camadas de argila também devam ser levados em consideração (Tabela 1).

Os dados gamaespectrométricos provêm da radiação emitida pelos radioelementos e não representam as quantidades presentes no solo, mas as representam qualitativamente. Este estudo indica apenas a distribuição espacial do potássio como indicativo de partes da área com vinhedos a serem monitoradas por meio de análise química do solo, para subsidiar o manejo das videiras. Da mesma forma, os teores de urânio e tório são indicativos da ocorrência de MO nos solos dos vinhedos, favorecendo o seu manejo.

O objetivo geral deste estudo foi avaliar a distribuição espacial de radioelementos no solo de vinhedos, utilizando o método de espectrometria de raios gama. Os objetivos específicos foram: 1) avaliar a variação espacial nos níveis dos radioelementos U, Th e K; 2) relacionar a distribuição espacial dos radioelementos analisados aos solos mapeados em estudo anterior (Flores et al., 2007); 3) contribuir para o zoneamento dos vinhedos, classificando as zonas de radioelementos em relação ao relevo e indicando as áreas a serem monitoradas em relação ao teor de K e inferindo o teor de MO pelos teores de U e Th.

Apesar de não caracterizar um estudo típico de agricultura de precisão, a variabilidade dos radioelementos pode inferir a variabilidade do solo das parcelas de vinhedos, seja sugerindo teores diferentes de matéria orgânica ou apontando possíveis doenças relacionadas a anomalias de potássio, provando ser uma ferramenta útil no processo de gestão da variabilidade espacial da área sem a necessidade de amostragem e análises destrutivas de solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram medidos os solos de 115 vinhedos, somando 409,853 hectares, sendo criado um banco de dados em sistema de informações geográficas (SIG), contendo dados vetoriais e *raster* da área de estudo. Os dados vetoriais dos vinhedos foram fornecidos pela viníco-

Tabela 1. Conteúdo de elementos radioativos em rochas sedimentares e seus solos, apresentando valores médios entre parênteses, segundo Dickson e Scott (1997).

Rochas sedimentares	Rocha			Solo		
	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)
Folhelhos Arqueanos	0,4-1,6 (0,9)	0,3-1,3 (0,9)	1-5 (2,7)	0,8	1,2	3
Outros folhelhos	0,1-4,0 (2,6)	1,6-3,8 (2,6)	10-55 (19)	0,7-3,0 (1,5)	1,2-5 (2,3)	6-19 (13)
Arenito	0,0-5,5 (1,8)	0,7-5,1 (2,3)	4-22 (12)	0,1-2,4 (1,3)	1,2-4,4 (2,1)	7-18 (11)
Carbonatos	0,0-0,5 (0,2)	0,4-2,9 (1,6)	0,0-2,9 (1,4)	-	-	-

la, sendo que a base cartográfica utilizou vetores do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2013).

Foi utilizado o modelo digital de elevação (MDE) da imagem ALOS RT1, com resolução de 12,5 m, sendo produto gerado a partir de dados de RADAR (ALOS PALSAR) com correção radiométrica do terreno (ASF Engineering, 2015).

O processamento das imagens foi realizado no *software* livre QGIS, versão 3.14 (QGIS, 2020). O MDE foi interpolado por krigagem, seguindo as etapas de vetorização em pontos (12,5 em 12,5 m), a fim de gerar uma imagem de cinco metros de resolução, melhorando a visualização dos vinhedos, sem alterar os valores originais da imagem do terreno (Hoff et al., 2017, Junges et al., 2017). A partir do modelo digital de elevação reamostrado, os aspectos da hipsometria foram integrados com imagens classificadas de radioelementos (U, Th e K).

O trabalho de campo foi feito entre julho e agosto de 2018, medindo-se a contagem total (TC), K (%), U (ppm) e Th (ppm) dos isótopos. As medidas foram feitas por espectrômetro de raios gama portátil (Radiation Solutions/Super Spec RS-125) com 1.024 canais espectrais, configurado para registrar contagens por 180 segundos, sendo feitas em contato direto entre o equipamento e o solo, salvando na memória do equipamento. As coordenadas geográficas foram obtidas por GPS de alta precisão para cada ponto de coleta de dados. Os dados foram obtidos numa grade aproximada de 200 metros na área dos vinhedos, totalizando 259 pontos (Figura 1). As medidas dos radioelementos obtiveram pontos, os quais foram interpolados por krigagem, gerando imagens com resolução de cinco metros, sendo os mapas elaborados também no *software* QGIS 3.14, pela função *layout*.

Os cálculos estatísticos foram baseados em Pimentel Gomes (1985), no *software* Libre Office Calc. Buscando diferenciar as medições aos tipos de solos, foram utilizadas estatísticas descritivas e gráficos comparativos. Foram elaborados mapas de elevação e de radioelementos e parâmetros, visando ao zoneamento de cada vinhedo e às operações aritméticas.

A partir dos mapas de U, Th e K, bem como de altimetria, foram recortados pelos polígonos dos vinhedos, a fim de mostrar a sua variabilidade no solo de cada vinhedo. Isso também pode fornecer os valores, excluindo o que não foi plantado com uvas viníferas, para melhor visualização dentro dos vinhedos.

Os solos da área estudada foram originados a partir de rochas sedimentares, principalmente arenitos de idade mesozoica da Formação Guará (Scherer et al., 2000, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020). As unidades de solo na área de estudo foram

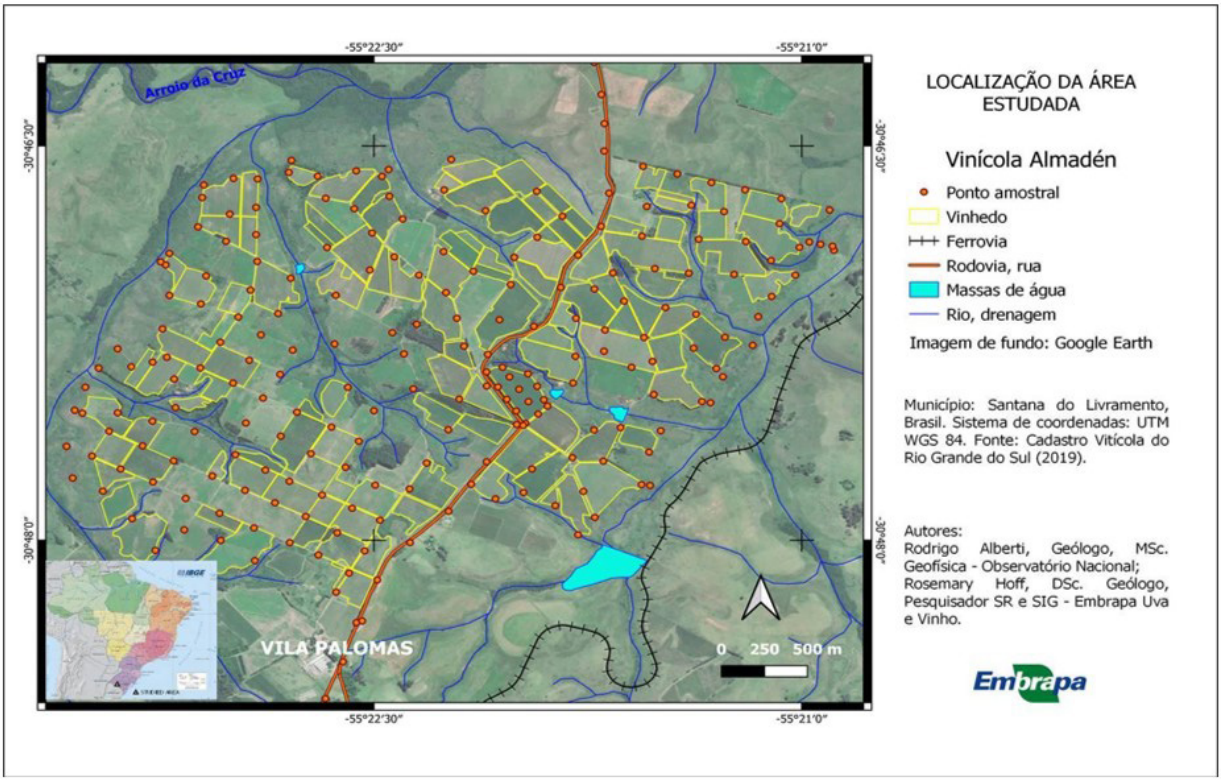


Figura 1. Localização e detalhe da área de estudo e pontos de coleta, Santana do Livramento, Rio Grande do Sul, Brasil. Base cartográfica: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2013).

mapeadas por Flores et al. (2007) na escala 1:50.000, com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa 1999), apresentando:

1) Alissolos: ocorrem em toda a extensão da área estudada e em menor porção ao sul, constituídos por material mineral, com horizonte B textural ou horizonte B nítico. Podem ter argila com atividade igual ou superior a 20 cmol/kg e alto teor de alumínio extraível, e saturação de alumínio maior que 50% e/ou saturação por bases menor que 50% na maior parte do horizonte B. Podem ter horizontes plínticos, se presentes, não estão acima de B e nem coincidem com a parte superficial do mesmo; horizonte Glei, se presente, inicia-se após 50 cm de profundidade e não coincide com a parte superficial do horizonte B, nem ocorre até este horizonte (Embrapa, 1999);
2) Argissolos: distribuídos por toda a área de estudo, principalmente nos terrenos de maior altitude; compostos por material mineral, horizonte B textural imediatamente abaixo de A ou E, baixa atividade argilosa, ou alta argila combinada com baixa saturação por bases, ou caráter lítico na maior parte do horizonte B;
3) Planossolos: nas porções nordeste e noroeste da área, nas zonas de menor altitude; compostos por material mineral com horizonte A ou E seguido de horizonte B; por não apresentarem o caráter sódico, perdem a precedência taxonômica para o horizonte plíntico (Embrapa, 2013).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A altitude da área estudada varia de 147 a 229 metros acima do nível do mar, sendo que as altitudes menores se localizam a noroeste, no vale do Arroio da Cruz, e outras a nordeste pelo seu afluente principal. As maiores elevações se situam no centro da área, constituídas por topos de colinas suaves de arenito, coincidindo com os vinhedos. Para uma melhor compreensão da altitude, foi feita uma classificação hipsométrica em três classes, conforme a Figura 2 e a Tabela 2.

As amostras de radioelementos foram classificadas por tipos de solo, conforme o mapeamento de Flores et al. (2007), mostrados na Tabela 3. Foram obtidos parâmetros estatísticos, como média aritmética, mediana, moda, desvio padrão, variância, valores mínimo e máximo. A avaliação da dispersão dos dados do coeficiente de variação deu-se segundo Pimentel Gomes (1985), sendo: menor ou igual a 10%, baixa dispersão; entre 10 e 20%, dispersão mé-

Tabela 2. Hipsometria em vinhedos da Vinícola Almadén, Santana do Livramento, Rio Grande do Sul, Brasil.

Classe de altitude (m)	Área (ha)	Porcentagem (%)
Baixa (147,37 - 175)	50,28	12,31
Média (175 - 200)	238,33	58,32
Alta (200 - 228,62)	120,00	29,37
Total	408,62	100,00

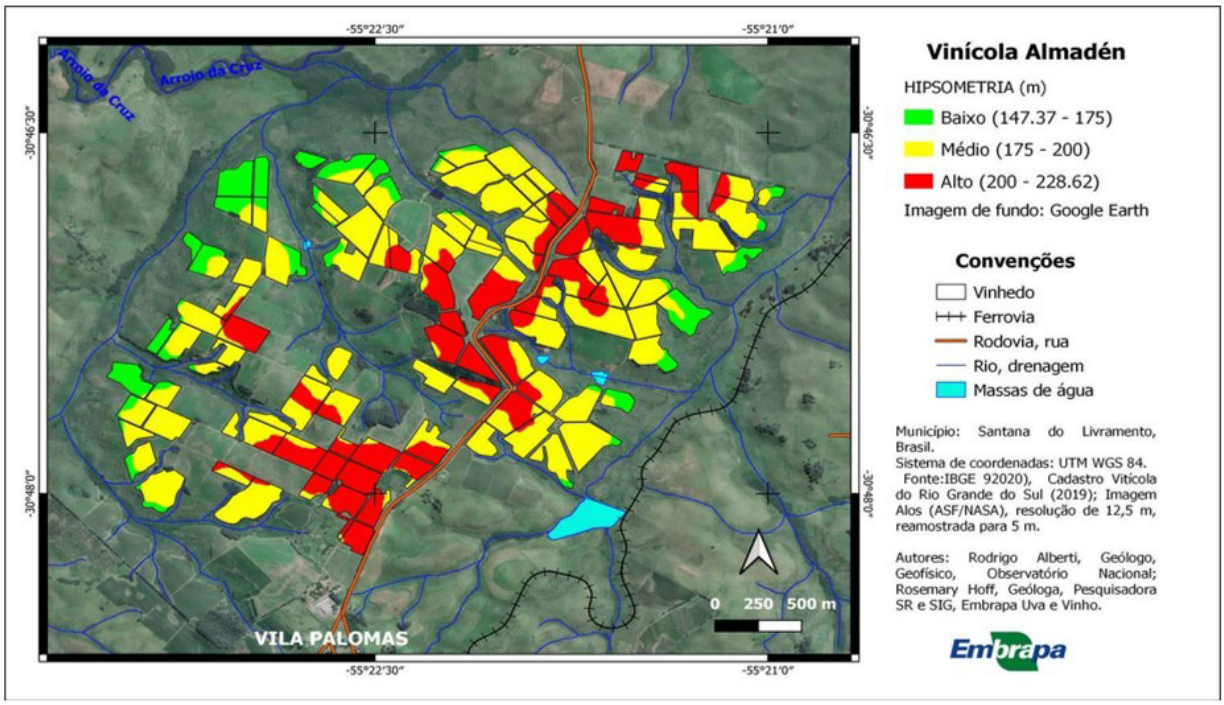


Figura 2. Hipsometria em vinhedos a partir de MDE ALOS (12,5 m de resolução), reamostrada para 5 m. Vinícola Almadén, Santana do Livramento, Rio Grande do Sul, Brasil. Base cartográfica: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2013).

Tabela 3. Distribuição de amostras para cada unidade de solo (Flores et al., 2007), conforme Alberti (2018).

Unidade de mapeamento de solo	n
Alissolo	84
Argissolo	138
Planossolo	37
Total	259

dia; entre 20 e 30%, alta dispersão; mais de 30%, dispersão muito alta.

Os teores de K, Th e U, para as três unidades de solo, apresentaram comportamentos semelhantes e, possivelmente, as variáveis indicam similaridade entre os tipos de solo na área de estudo (Figura 3). A frequência percentual de K (Figura 3A) não foi reclassificada, devido à pequena quantidade de valores diferentes da variável no conjunto amostral. Foi possível verificar a similaridade de comportamento dos Alissolos e Argissolos, com maior percentual de amostras igual a 0% de K. Observou-se nos Argissolos a ocorrência de uma amostra com K igual a 1,9%, o que pode ser considerado um *outlier* do conjunto. A linha de Planossolos indica maior quantidade de amostras com K igual a 0,2%. Os Planossolos tiveram um percentual menor em relação às demais unidades, como 0 e 0,1%. Assim, em uma faixa entre 0,4 a 0,8%, os Planossolos foram superiores aos outros dois tipos de solo.

Os valores de Th (Figura 3B) foram divididos por conjunto amostral em 23 classes com amplitude 0,4. Isso pode explicar o comportamento das linhas para cada tipo de solo. Os picos alternam com valores mais baixos para as três linhas. Devido à baixa mobilidade geoquímica do Th (Rebello, 2000), permanecendo fixo durante os processos de intemperismo e pedogenéticos, a distribuição observada nos gráficos reflete o contexto geológico.

Os valores de U (Figura 3C) são absolutos, sem definição de classes. Uma maior porcentagem de amostras com valor próximo a 0 ppm foi observada nas três unidades de solo. Os teores subsequentes apresentaram-se em picos percentuais alternados entre os tipos de solo.

O mapa de K (Figura 4A) apresenta a sua variabilidade espacial na área, com maior teor na porção sul do terreno em dois grupos de vinhedos. Isso pode ser devido à mobilidade desse elemento, que é facilmente transportado para áreas mais baixas. Possivelmente, a ocorrência no sudoeste se deve ao acúmulo de material de morros próximos, (200 e 220 metros de altitude). O mapa de Th (Figura 4B) mostra a variabilidade espacial desse elemento entre os vinhedos, com uma maior concentração na porção NNE. A baixa mobilidade do elemento sugere que as áreas de maior enriquecimento apresentam alto teor de óxidos de ferro nas partes mais superficiais do solo. A variabilidade espacial do U entre os vinhedos (Figura 4C) destaca-se pelo alto teor na porção central. Outros pontos da área apresentam concentração notável desse radioelemento, como as regiões nordeste, noroeste e sudeste. A ocorrência de U não parece estar relacionada à elevação. Foram definidas três classes de zoneamento, como alto, médio e baixo teor para cada radioelemento.

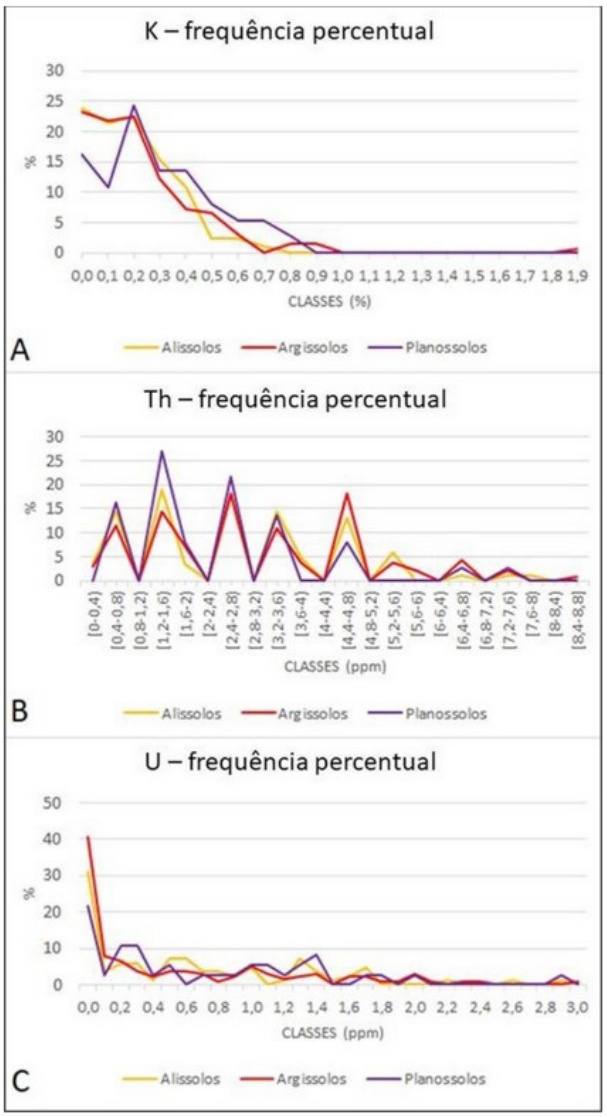


Figura 3. Frequência Percentual de K (A), Th (B), U (C) para solos de vinhedos, conforme Alberti (2018). Santana do Livramento, Rio Grande do Sul, Brasil.

Os intervalos foram estabelecidos a partir da amplitude de cada variável dividida por três classes, cujas áreas estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Classificação de zoneamento de radioelementos em vinhedos na Vinícola Almadén, conforme Alberti (2018), em Santana do Livramento, Rio Grande do Sul, Brasil.

Radioelemento	Baixo		Médio		Alto		Total (ha)
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%	
Potássio	175,41	42,93	180,50	44,17	52,72	12,90	408,63
Tório	177,36	43,40	137,14	33,56	94,15	23,04	408,65
Urânio	200,48	49,06	166,13	40,65	42,07	10,29	408,68

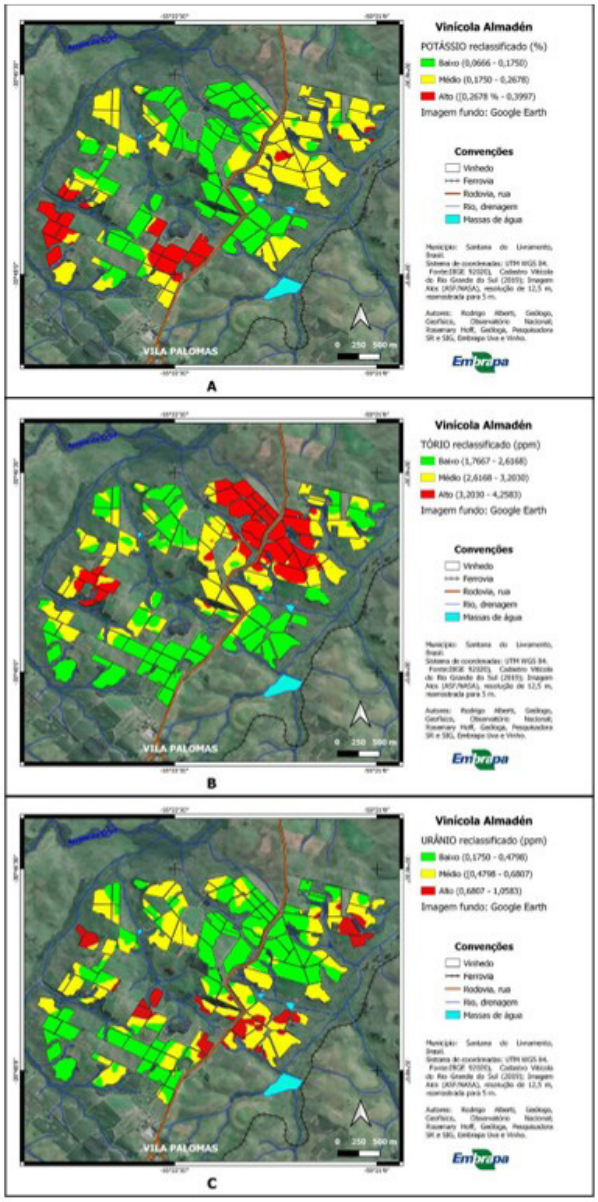


Figura 4. Classificação de zoneamento dos teores de potássio (A), tório (B) e urânio (C), Santana do Livramento, Rio Grande do Sul, Brasil.

Houve diferença de área, relacionada à soma dos polígonos de vinha (409,853 ha) devido ao recorte das imagens classificadas, em torno de 408,65 ha, devido à *pixelização* da imagem final. Este fato produziu bordas vazias em comparação com seus produtos vetorizados. Essa diferença em torno de um hectare, ao longo de quase de 410 hectares, não foi considerada relevante na análise deste estudo.

A distribuição das classes de radioelementos e sua relação com as classes de elevação, ao longo da área dos vinhedos, podem ser observadas na Figura 5 (A, B e C), e para cada radioelemento foram geradas nove classes combinando os intervalos de elevação. Os valores de K mais baixos ocorreram em terrenos de média altitude. Quanto ao Th, os maiores valores baixos, médios e altos ocorrem nas altitudes médias dos vinhedos. Em termos de U, valores mais baixos, médios e altos também acompanham as altitudes médias dos terrenos dos vinhedos.

De acordo com De Vos et al. (2006), a mobilidade do U no solo depende da mobilidade do cátion UO_2^{2+}, sendo a solubilidade do radioelemento aumentada pela ação de ácidos orgânicos. Quando o U é dissolvido em água, associa-se diretamente com a MO e os óxidos de ferro e fosfatos dissolvidos. Kabata-Pendias (2010) destaca que, do ponto de vista geoquímico, Th tem um comportamento semelhante ao U, tendo mobilidade dependente de Th^{4+}. A solubilidade deste cátion, em uma ampla faixa de pH, é responsável pelo seu deslocamento. A solubilidade do Th aumenta na presença de ácidos orgânicos, porém sua mobilidade é prejudicada devido à sua precipitação, por exemplo, na forma de fosfatos e óxidos. Segundo Fráguas (1996), o excesso de potássio pode causar a dessecação do cacho de uva, devido à menor absorção de cálcio e magnésio. Isso corresponde a um distúrbio fisiológico que ocorre no início do amolecimento dos bagos, caracterizado pelo murchamento das pontas dos cachos, que pode progredir para o resto do cacho. Flores (2011) avaliou parâmetros edáficos para orientar a implantação dos vinhedos, sobre os teores de K relacionados à MO. Se o K for inferior a 1,5 ppm e a MO for inferior a 60 kg/ha, o solo é recomendado para a viticultura (Tabela 5).

Assim, menores teores de K proporcionariam melhores condições para o estabelecimento de vinhe-

Tabela 5. Teores de potássio e teores de matéria orgânica com respectivas recomendações de acordo com Flores (2011).

Teor de potássio (ppm*)	
≤1,5	Muito recomendável
1,6-3,0	Recomendável
3,1-5	Pouco recomendável
≥5,1	Não recomendável
Teor de matéria orgânica (kg/ha)	
≤60	Muito recomendável
60-90	Recomendável
≥91	Não recomendável

* Teor de potássio por análise química.

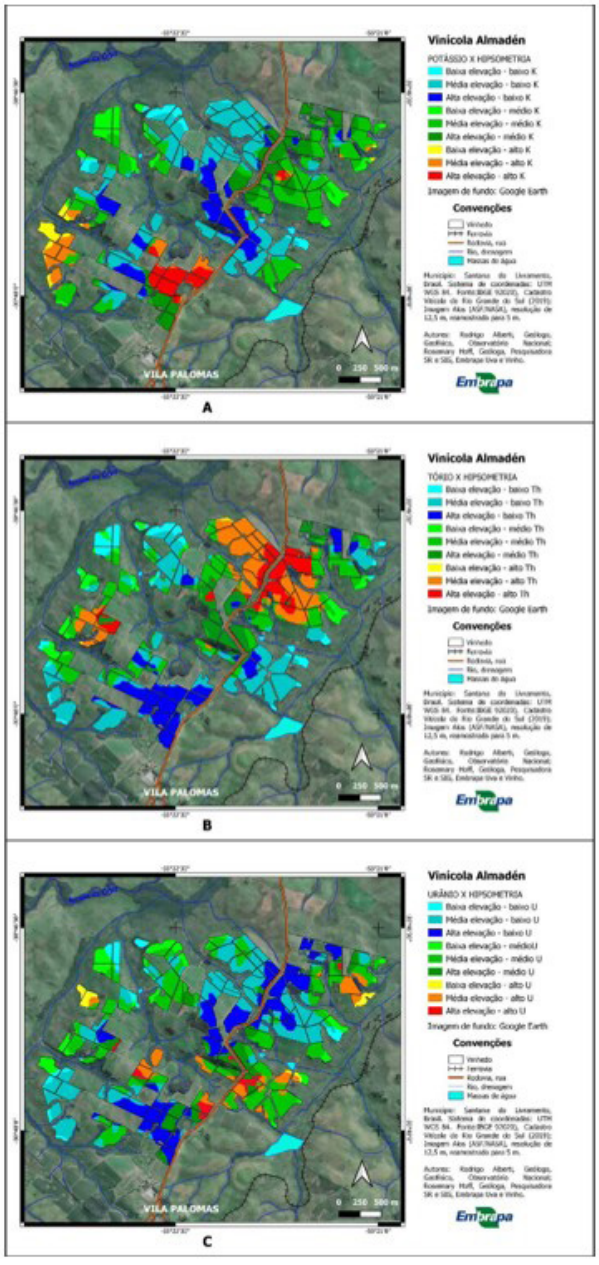


Figura 5. Mapa de cruzamento de hipsometria com mapas de potássio (A), tório (B) e urânio (C), na Vinícola Almadén, Santana do Livramento, Rio Grande do Sul, Brasil.

dos. Recomenda-se observar as áreas da classe com menor teor de K, corrigindo e monitorando as áreas com altos teores, a SE e SW da área (Figura 4). Quanto maior o teor de U e Th, menor a quantidade de MO. Assim, recomenda-se observar as áreas de alto teor de U, bem como de alto teor de Th, a fim de monitorá-las, por meio de análises periódicas do solo, principalmente durante o ciclo fenológico, para corrigir as anomalias a tempo. Os mapas de conteúdo dos radioelementos possibilitaram a visualização de sua variabilidade espacial, posteriormente interpolados para visualização geográfica.

4 CONCLUSÃO

A partir dos valores estatísticos descritivos, observou-se que os níveis de U, Th e K não foram muito eficientes para a comparação com as unidades de solo na área de estudo. Os perfis do solo desta área com vinhedos indicaram uniformidade nos teores de U e K da rocha subjacente à superfície do solo. Em relação ao Th, houve o enriquecimento em alguns níveis do solo, podendo ser explicado pela retenção do radioelemento nos óxidos e hidróxidos de Fe e Ti oriundos de arenitos da Formação Guará. No entanto, o zoneamento proporcionou a visualização da variabilidade espacial dos radioelementos, contribuindo para as inferências sobre a variabilidade espacial dos teores de K e MO no solo.

Os mapas de radioelementos podem indicar quais os vinhedos que necessitam de um monitoramento mais ou menos intenso. Os vinhedos que demandam um monitoramento menos intenso correspondem aos menores valores de K e aos maiores valores de U e Th.

A espectrometria gama pode ser uma alternativa rápida para medir as variações de radioelementos ao longo da área com vinhedos, o que possibilita a aplicação dessa técnica no contexto da viticultura de precisão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de fomento à pesquisa FINEP, CNPq e Fapergs, às instituições Embrapa e UNISINOS, bem como a Miolo Wine Group.

REFERÊNCIAS

ALBERTI, R. **Gamaespectrometria aplicada ao estudo do solo em área vitícola em Santana do Livramento, RS**. 2018. Monografia (Bacharelado em Geologia). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.

ASF ENGINEERING. **Radiometrically Terrain Corrected ALOS PALSAR products**. 2015. Disponível em: https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/03/rtc_product_guide_v1.2.pdf. Acesso em: 01 out. 2024.

BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. **Agricultura de precisão**: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1002959/1/Agriculturadeprecisao2014.pdf. Acesso em: 01 out. 2024.

DE VOS, W.; TARVAINEN, T.; SALMINEN, R.; REEDER, S.; DE VIVO, B.; DEMETRIADES, A.; PIRC, S.; BATISTA, MJ; MARSINA, K.; OTTESEN, RT; O'CONNOR, PJ; BIDOVEC, M.; LIMA, A.; SIEWERS, U.; SMITH, B.; TAYLOR, H.; SHAW, R.; SALPETEUR, I.; GREGORAUSKIENE, V.; HALAMIĆ, Josip; SLANINKA, I.; LAX, K.; GRAVESEN, P.; BIRKE, M.; BREWARD, N.; ANDER, EL; JORDÂNIA, G.; DURIS, M.; KLEIN, P.; LOCUTURA, J.; BEL-LAN, A.; PASIECZNA, A.; LIS, J.; MAZREKU, A.; GILUCIS, A.; HEITZMANN, P.; KLAVER, G.; PETERSELL, V. **Geochemical atlas of Europe:** Part 2, interpretation of geochemical maps, additional tables, figures, maps and related publications. Espoo: Geological Survey of Finland, 2006.

DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. **AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 187-200, 1997.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2013.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Brasília: Embrapa, 1999.

FLORES, C. A. **Influência do solo na tipicidade do vinho.** 2011. Disponível em: http://www.infobibos.com/Artigos/2011_4/vinho/index.htm. Acesso em: 01 out. 2024..

FLORES, C. A.; PÖTTER, R.; FASOLO, P.; HASENACK, H.; WEBER, E. **Mapa semidetalhado *de* solos – Folha Palomas**. Porto Alegre: Editora da Universidade, 2007. (1 mapa: color.; 80 x 60 cm; Escala 1:50.000; 1 CD-ROM).

FRÁGUAS, J. C. **A importância do boro para a videira.** Bento Gonçalves: Embrapa-CNPUV, 1996. 4 p. (Comunicado Técnico, 17).

HOFF, R.; BERGMANN, M.; ALBERTI, R. Geologia integrada a dados de relevo para caracterização de terroir vitivinícola em Pinheiro Machado, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18. (SBSR), 2017, Santos. **Anais** [...]. São José dos Campos: INPE, 2017. p. 6391-6398. Disponível em: http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP6W34M/3PSMCQQ. Acesso em: 01 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha Digital Municipal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. Disponível em: http://servicodados.ibge.gov.br/Download/Download.ashx?u=geoftp.ibge.gov.br/malhas_digitais/municipio_2015/rs.zip. Acesso em: 01 out. 2024.

JUNGES, A. H.; PAULETTO, H.; ALBERTI, R.; HOFF, R.; DUCATI, J. R. Orbital remote sensing to monitoring vine cycle using vegetation index in "Campanha Region", Rio Grande do Sul State, Brazil. In: GIESCO, 2017, Mendoza. **Proceedings** [...]. 2017. Disponível em: https://www.giesco.org/article-orbital-remote-sensing-to-monitoring-vine-cycleusing-vegetation-index-in-%E2%80%9Ccampanha-region%E2%80%9D--riograndе-do-sul-state-brazilteledectection-orbital--pour-la-surveillance-du-cycle-de-la-vignepar-859.html. Acesso em: 01 out. 2024.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. Boca Ratón: CRC Press, 2010. DOI: http://doi.org/10.1201/b10158.

KODUR, J. Effects of juice pH and potassium on juice and wine quality. **Vitis**, v. 50, n. 1, p. 1-6, 2011. Disponível em: https://ojs.openagrar.de/index.php/VITIS/article/view/4052. Acesso em: 01 out. 2024.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental.** São Paulo: Nobel, 1985.

QGIS. **Guia do Usuário QGIS**. 2020. Disponível em: https://docs.qgis.org/3.10/pt_BR/docs/user_manual/. Acesso em: 01 out. 2024.

REBELLO, A. M. A. **Processos supergênicos na distribuição de radônio em paisagens tropicais úmidas.** 2000. 209 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SCHERER, C.; FACCINI, U.F.; LAVINA, E. L. Arcabouço estratigráfico do Mesozóico da Bacia do Paraná. In: HOLZ, M.; DE ROS, L.F. (eds.). **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS/CIGO, 2000. p. 335-354.

SENA, K. N.; MALTONI, K. L.; FARIA, G. A.; CASSIOLATO, A. M. R. Organic carbon and physical properties in sandy soil after conversion from degraded pasture to Eucalyptus in the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. e0150505, 2017. DOI: http://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150505.

67

Uso da fluorescência da clorofila como variável para avaliar a evolução das antocianinas em uvas da cultivar Merlot em diferentes solos

Use of chlorophyll fluorescence as a variable to evaluate the evolution of anthocyanins in Merlot grapes cultivated in different soils

Giseli Rodrigues Crizel[1], César Luis Girardi[2], Carlos Alberto Flores[3], José Maria Filippini-Alba[4]

[1] *GC Assessoria de Alimentos, Pelotas (RS), Brasil, giseli.crizel@gmail.com*
[2] *Embrapa Uva e Vinho, Bento Gonçalves (RS), Brasil, cesar.girardi@embrapa.br*
[3] *Aposentado, Embrapa Clima Temperado, Pelotas (RS), Brasil, cflores@terra.com.br*
[4] *Embrapa Clima Temperado, Pelotas (RS), Brasil, jose.filippini@embrapa.br*

RESUMO

Antocianinas são compostos fenólicos de primordial importância em uvas tintas destinados à produção de vinhos tintos, sendo seu acúmulo afetado pela variabilidade edafoclimática. Diante disso, foi avaliada a aplicabilidade do equipamento Multiplex® 3 (10-270, Force-A, France) durante duas safras como parâmetro de evolução das antocianinas em uvas da cultivar Merlot, clone 347. Esse equipamento determina de forma não destrutiva o índice de antocianinas através da correlação com o teor de fluorescência da clorofila medida diretamente na uva. O experimento foi conduzido no Vale dos Vinhedos, na cidade de Bento Gonçalves/RS, em vinhedo que apresenta cinco diferentes classes de solos. Em cada solo foram realizadas leituras não destrutivas de antocianinas a campo em 12 cachos em diferentes períodos de maturação, coletando em cada momento bagas para determinar em laboratório a maturação tecnológica (sólidos solúveis – SS e acidez titulável – AT) e teor de antocianinas. O equipamento demonstrou ser eficaz para o monitoramento da evolução das antocianinas apresentando um elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,92$) quando comparado com os métodos laboratoriais convencional (destrutivo) utilizados para acompanhamento da maturação de uvas utilizadas para elaboração de vinhos. Os resultados obtidos demonstram que a fluorescência da clorofila apresenta potencial para uma rápida classificação de uvas intactas baseado no índice de antocianinas, e, portanto, para um controle rápido de maturidade fenólica. Quanto às classes de solos não foi possível verificar diferença nas principais datas de avaliação, mas algumas diferenças no matiz e teor de antocianinas em casos específicos.

Palavras-chave: vinho brasileiro; evolução da qualidade fenólica; viticultura de precisão; *Vitis vinifera*.

ABSTRACT

Anthocyanins are phenolic compounds of prime importance in red wine grapes, and their accumulation affected by soil and climate variability. Therefore, the applicability of the Multiplex® 3 equipment (10-270, Force-A, France) was evaluated over two harvests as a parameter for the evolution of anthocyanins in grapes of the cultivar Merlot, clone 347. This equipment non-destructively determines the index of anthocyanins by correlating it with the fluorescence content of chlorophyll measured directly on the grape. The experiment carried out in Vale dos Vinhedos in the city of Bento Gonçalves/RS in a vineyard that has five different soil classes. In each soil, non-destructive anthocyanin *in loco* readings were carried out in the field of 12 bunches at different maturation periods, collecting berries at each moment to determine the technological maturation (Soluble solids - SS and titratable acidity - TA) and anthocyanin content in the laboratory. The equipment proved to be effective in monitoring the evolution of anthocyanins, showing a high coefficient of determination (R2 = 0.92) when compared to conventional (destructive) laboratory methods used to monitor the ripeness of grapes used in wine making. The results

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000041

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

obtained demonstrate that chlorophyll fluorescence has the potential for a rapid classification of intact grapes based on the anthocyanin index, and therefore for a quick control of phenolic maturity. Soil classes was not verified differences on the main evaluation dates, but there were some differences in colour and anthocyanin content in specific cases.

Keywords: precision agriculture; phenols evolution; wine; precision viticulture; *Vitis vinifera*.

1 INTRODUÇÃO

Videiras (*Vitis vinifera* L.) são uma das culturas mais importantes do mundo, e cerca de 80% de uvas cultivadas são utilizadas na produção de vinho (Kammerer et al., 2004). A qualidade dos vinhos tintos é afetada pelo estádio de maturação das uvas, e a síntese e o acúmulo de compostos como as antocianinas são alterados pela variabilidade edafoclimática (Bramley et al., 2011; Cheng et al., 2014; Scarlett et al., 2014). Essas variações se devem, em parte, à radiação solar, à topografia, ao aporte hídrico, ao manejo e às características do solo (Anesi et al., 2015; Wang et al., 2015). Assim, torna-se importante estudar a composição da uva e do vinho a partir de diferentes solos (Bramley et al., 2011; Anesi et al., 2015), pois para elaborar vinhos tintos de qualidade enológica deve-se acompanhar a evolução da maturação fenólica (Cozzolino, 2015; Ribéreau-Gayon; Stonestreet, 2006), principalmente a evolução das antocianinas em uvas tintas (Kuhn et al., 2013). Geralmente, a determinação da maturação tecnológica (açúcares e acidez titulável) é a mais utilizada, por ser prática e rápida (Rodríguez-Pulido et al., 2013). No entanto, não é suficiente para predizer a qualidade enológica da uva (Zamora, 2003), sendo necessária pelo menos uma das variáveis da maturação fenólica (antocianinas e/ou taninos), que indica a potencialidade da matéria-prima para elaboração dos vinhos finos (Anesi et al., 2015; Cozzolino, 2015; Wang et al., 2015). Essa última normalmente inclui análises químicas destrutivas, demoradas e dispendiosas (Fragoso et al., 2011), o que limita o uso quando se deve avaliar um grande número de amostras, considerando tipos de solos, climas, variedades, clones e porta-enxertos (Baluja et al., 2012; Rodríguez-Pulido et al., 2013).

Todos esses fatores podem afetar o acúmulo de antocianinas e, por conseguinte, a qualidade do vinho (King et al., 2014). Assim, essa relação deve ser avaliada para cada local, auxiliando na tomada de decisões relativas à gestão do vinhedo, à colheita e à vinificação (Baluja et al., 2012; Bramley et al., 2011). Entretanto, essas determinações dependem da disponibilidade de ferramentas que possibilitem a avaliação dos frutos na pré-colheita, de modo rápido e preferentemente não destrutivo (Giovenzana et al., 2015; Rossi et al., 2013). É nessa perspectiva que, nos últimos dez anos, têm sido desenvolvidos métodos não destrutivos, que preenchem esses pré-requisitos e que possibilitam uma agricultura de precisão (AP), como fluorímetros portáteis (Hagen et al., 2006), imagem hiperespectral (Yang et al., 2015), espectroscopia VIS/NIR (Ferrer-Gallego et al., 2011) e os sensores de fluorescência da clorofila (Agati et al., 2013; Betemps et al., 2012; Cerovic et al., 2008). Todos esses equipamentos adaptam-se à AP, pela facilidade de medição conforme um desenho reticular, com espaçamento métrico. Alguns deles envolvem tempos de medição curtos com captação in loco, isto é, no próprio vinhedo. Esse desenho reticular, com medição nos pontos de uma grade imaginária adequada à forma do vinhedo, tem sido criticado eventualmente, mas permite o manuseio da informação com precisão e o resultado encaixa-se muito bem no contexto da AP.

Sensores de fluorescência da clorofila vêm sendo calibrados para determinar o índice de antocianinas em diversas cultivares tintas (Agati et al., 2013; Betemps et al., 2012; Cerovic et al., 2008). No entanto, o equipamento precisa ser calibrado por métodos externos para cada aplicação específica, como diferentes áreas de produção e cultivares, sobretudo porque o número de trabalhos que aperfeiçoaram a técnica é escasso (Agati et al., 2013; Ben Ghozlen et al., 2010; Tuccio et al., 2011), principalmente no Brasil. Diante disso, objetivou-se neste trabalho testar a aplicabilidade do sensor de fluorescência da clorofila para monitorar a evolução das antocianinas durante a maturação de uvas Merlot. Além disso, buscou-se avaliar a variação deste índice durante a maturação em vinhedos, de mesma cultivar e clone, em cinco classes de solo, além de avaliar os respectivos vinhos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material vegetal

A coleta dos dados e das amostras foi realizada em vinhedo localizado no Vale dos Vinhedos, município de Bento Gonçalves/RS, Brasil (latitude entre 29°11'11" S e 29°11'20" S, longitude entre 51°34'53" O e 51°35'02" O, altitude de 550 a 610 m). Nesse local

que possui denominação de origem (DO), a Merlot é uma das variedades mais utilizadas. Os vinhedos foram formados em 2005 com a cultivar Merlot (*Vitis vinifera*), com o clone 347, sobre porta-enxerto Paulsen 1103, conduzido em espaldeira. O experimento foi dividido em três: 1) calibração do sensor de fluorescência; 2) estudo da evolução das antocianinas no espaço e no tempo, para cinco classes de solos; e 3) avaliação dos respectivos vinhos.

2.2 Calibração do sensor de fluorescência (Multiplex®3)

O índice de antocianinas foi determinado com o sensor de fluorescência da clorofila Multiplex®3 (10-270, Force-A, France), usando o índice Ferari de antocianinas. O sensor possui díodos emissores de luz em diferentes comprimentos de onda que ao incidirem sobre o material vegetal determinam o índice de antocianinas baseado na fluorescência da clorofila do epicarpo dos frutos, que pode ser filtrada pelas antocianinas. Para calibrar o sensor, como detector de antocianinas na uva Merlot, foram usadas plantas previamente marcadas após o véraison (50% de desenvolvimento da cor). Com o sensor (Multiplex) avaliaram-se três cachos em cada planta, e as amostras foram analisadas semanalmente, em sete semanas de avaliação. Foram realizadas duas leituras por cacho, em regiões opostas, totalizando 24 leituras por avaliação. As bagas foram coletadas mediante corte do pedicelo e foram transportadas em caixas de poliestireno expandido até o laboratório. No laboratório as bagas foram analisadas quanto aos teores de sólidos solúveis (°Brix), conforme Parpinello et al. (2013) e acidez titulável do mosto, conforme Silva et al. (2004). O epicarpo das bagas foi imerso em nitrogênio (N_2) líquido, posteriormente elas foram trituradas em moinho de bolas (2 x 30 segundos) e armazenadas a -20 °C até o momento da extração e quantificação das antocianinas totais e taninos totais, por hidrólise ácida, conforme Ribereau e Stonestr (1966).

2.3 Análise da variabilidade espacial dos índices de antocianinas

Os vinhedos foram georreferenciados, servindo de base para a criação de cartas de altimetria, declividade e malha (10 m × 10 m) de coordenadas para o mapeamento dos solos. Nos vinhedos foram georreferenciadas 248 plantas.

Caracterizaram-se três classes taxonômicas de primeira ordem de solos (Flores et al., 2012): a) Cambissolos (CXve 1, 2, 3), que ocupam 34,7% da área apresentam alta saturação de base; b) Argissolos (PBACal 1, 2, 3), 26,0% da área, com alta saturação por alumínio; e c) Neossolos (RRh 1, 2, 3, 4), 39,3% da área, que são rasos e pedregosos, com ocorrência de alto teor de carbono orgânico, no caso. Os solos foram agrupados em cinco unidades em função do manejo (Figura 1), existindo significativa influência da declividade (Filippini-Alba et al., 2021).

Os tratos culturais e o manejo da vegetação foram realizados nas mesmas datas e intensidade em toda a área. A evolução das antocianinas da uva foi acompanhada com avaliações realizadas em sete épocas, ou seja, sete semanas após o véraison (SAV). Em 2014 e 2015, as avaliações foram realizadas a partir do véraison até o momento da colheita, semanalmente. Os semivariogramas e mapas foram executados no aplicativo GS+ considerando os índices de antocianinas derivados do sensor de fluorescência. Os mapas foram construídos com base na média do índice de antocianinas de seis leituras. Em todos os casos de ausência de variabilidade espacial foi usado o método de interpolação por inverso do quadrado da distância.

2.4 Efeito das classes de solo na composição da uva e do vinho

As amostras de uva foram avaliadas quanto ao teor de sólidos solúveis (°Brix) e acidez titulável do mosto, as antocianinas totais e taninos totais da película, conforme descrito no item 2.2. Os vinhos foram elaborados por microvinificação de cada uma das cinco

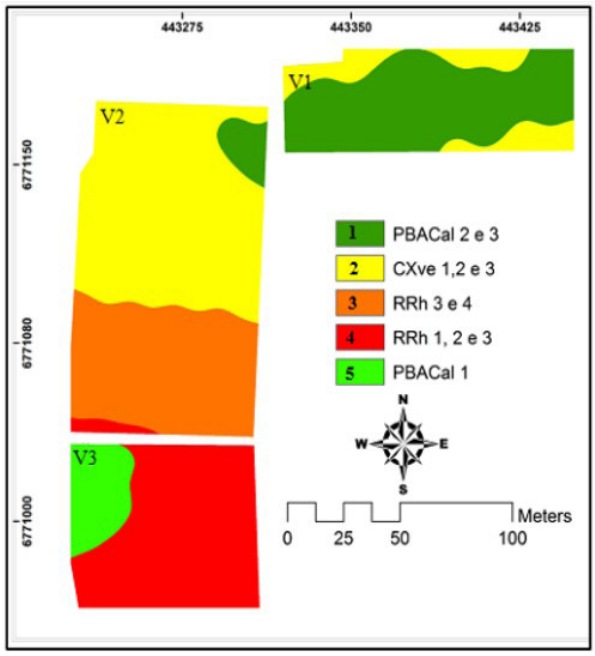


Figura 1. Esquema representativo dos solos considerados para coleta dos dados, Argissolos classe 1 (PBACal 2, 3) e classe 5 (PBACal 1), Cambissolos classe 2 (CXve 1, 2, 3), e Neossolos classe 3 (RRh 3 e 4) e classe 4 (RRh 1,2 e 3).
Fonte: Laboratório de Planejamento Ambiental/ Embrapa Clima Temperado.

classes de solo, colheram-se 40 kg de uva, os quais foram processados, então, transferidos para recipientes de vidro de 20 L, adicionando-se 50 mg.L^{-1} de SO_2 em cada um deles. A seguir, adicionou-se 0,20 g.L^{-1} de levedura seca ativa (*Saccharomyces cerevisiae*), fechando-se os recipientes. Após oito dias de fermentação alcoólica, os vinhos foram transferidos para recipientes de vidro e armazenados a 24 ºC ± 1 ºC até que a concentração de açúcar fosse menor que 4 g.L^{-1}. A fermentação malolática ocorreu naturalmente. Adicionou-se, então, SO_2 até a concentração de 50 mg L^{-1}, transferindo os vinhos para garrafas de 750 mL, as quais foram fechadas e armazenadas a 15 ºC ±1 ºC. Nos vinhos, após seis meses de envelhecimento, foram avaliados teor de antocianinas, índice de polifenóis totais – IPT (Ribéreau-Gayon; Stonestreet, 2006), taninos (Ribereau; Stonestr, 1966) e as absorbâncias 420, 520 e 620 nm em espectrofotômetro UV/VIS, com cubeta de 1 mm de percurso óptico. A intensidade de cor foi calculada pela soma das três absorbâncias (420, 520 e 620 nm) e o matiz pela divisão das absorbâncias (absorbância em 420 dividida pela absorbância em 520 nm).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Calibração do sensor de fluorescência da clorofila (Multiplex®3)

A relação entre os dois métodos de determinação de antocianinas na uva Merlot foi obtida por regressão, na qual se obteve uma curva polinomial e um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,92$, o que indica uma relação forte entre os dois métodos (Figura 2). Esse foi o primeiro estudo com sensor de fluorescência a ser aplicado para uva Merlot em vinhedos brasileiros, na região do Vale dos Vinhedos, Bento Gonçalves/RS, Brasil. Desse modo, fica evidenciado que se trata de um bom método para estimar a evolução de antocianinas na uva Merlot, à semelhança do que já havia ocorrido com outras cultivares em outros terroirs (Ben Ghozlen et al., 2010; Agati et al., 2013; Tuccio et al., 2011; Bramley et al., 2011; Cerovic et al., 2008). Quanto às relações entre os teores de taninos totais da película e o índice de antocianinas (Mx), se obteve um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,73$ (Figura 2). Assim, o método de campo para determinar taninos, considerando o equipamento multiplex, é algo menos preciso que o método convencional. No entanto, pode-se verificar com esses resultados que a aplicabilidade do sensor de fluorescência da clorofila é uma forma viável para monitorar a evolução de antocianinas do epicarpo em uvas Merlot.

3.1.1 Maturação e variabilidade espacial do índice de antocianinas (Mx)

Para os índices de antocianinas houve incremento durante as primeiras quatro semanas após o véraison (SAV) e, nas duas últimas semanas, houve um decréscimo em todas as uvas, independentemente da classe de solo. Esse evento ocorre frequentemente, pois o teor de antocianinas na película da uva atinge um máximo entre a terceira e a quarta SAV, ocorre um decréscimo e tende a se estabilizar próximo à colheita (Kennedy et al., 2001; Ribéreau-Gayon; Stonestreet, 2006; Wang et al., 2015).

A variabilidade espacial do índice de antocianinas (Mx) foi avaliada ao longo da maturação durante os ciclos de 2013/2014 e 2014/2015 (Figura 3). Em ambos os ciclos a variabilidade do índice de antocianinas foi maior no início da maturação. Já com a evolução do amadurecimento se obtiveram comportamentos ligeiramente distintos entre os ciclos. Para o primeiro ciclo avaliado 2013/2014, as médias do índice de antocianinas não apresentaram variabilidade entre os solos nas principais datas de coleta, ou seja, próximo à colheita final. Porém, os Argissolos (PBACal 2 e 3), Cambissolos (CXve 1, 2, 3) e Neossolos (RRh 3

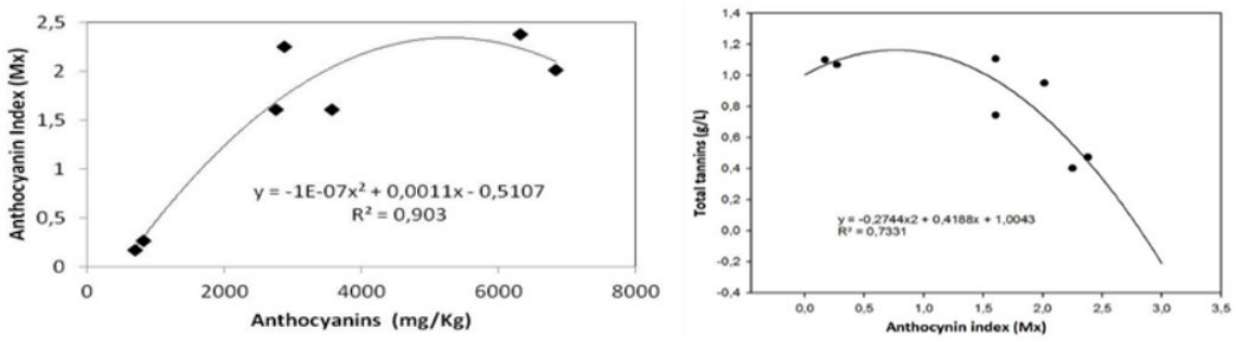


Figura 2. Relação entre o índice de antocianinas determinado pelo sensor e o terror de antocianinas determinado pelo método convencional (A), Coeficiente de determinação entre o índice de antocianinas e o teor de taninos (B) presente no pericarpo da uva.

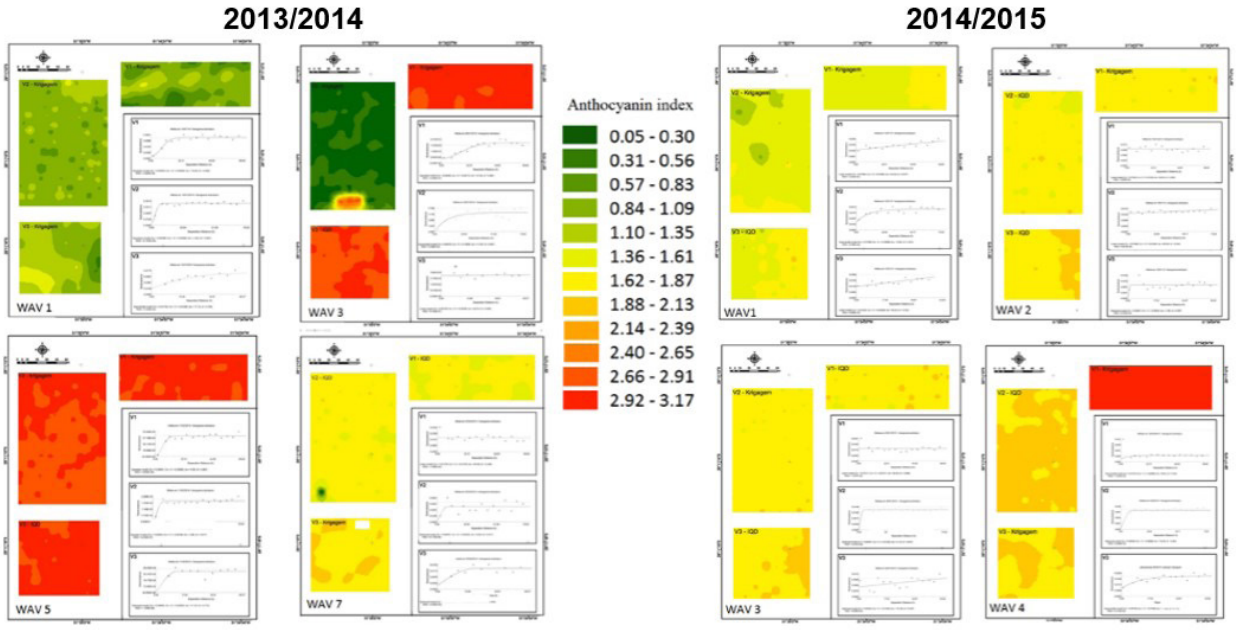


Figura 3. Mapas mostrando a variabilidade especial do indice de antocianinas nos vinhedos 1, 2 e 3 em relação às classes de solo para os ciclos correspondentes. WAV = Semanas após o véraison.

e 4) apresentaram uma variabilidade que parece ter como principal causa a declividade (20 a 45%) desse vinhedo e não as classes de solos; a parte do vinhedo com maior declividade apresentou menor índice de antocianinas para essa data. Diferentemente do primeiro ciclo avaliado, o segundo ciclo (Figura 3, 2014/15) apresentou variabilidade espacial próximo à colheita, sendo o Cambissolo (CXve 1, 2, 3) o que teve os maiores índices de antocianinas em relação ao Neossolo (RRh 1, 2, 3, 4). Essa variabilidade ocorreu na quinta SAV, período em que os índices de antocianinas foram mais elevados, seguido do decréscimo até o momento da colheita. A heterogeneidade temporal e espacial das uvas deve ser acompanhada, principalmente no que se refere às antocianinas, a fim de embasar as decisões relativas ao momento da colheita (Giovenzana et al., 2015). Nesse sentido, os semivariogramas e os índices de antocianinas mostraram que não houve diferença entre as classes de solos avaliadas na última coleta dos ciclos 2013/2014 e 2014/2015. Isso demonstra que independentemente da classe de solo, no momento da colheita, as uvas poderiam ser colhidas em conjunto, sem a necessidade de uma coleta seletiva. Um trabalho realizado por Van Leeuwen et al. 2004 mostra que as condições climáticas do ciclo, tipos de solo e cultivares podem influenciar a composição das bagas e dos respectivos vinhos. Em nosso experimento o índice de antocianinas parece ser mais influenciado pelo ciclo do que pelas classes de solo, concordando com estudos de Pereira et al. (2006) e Roullier-Gall et al. (2014), que demonstram ser o ciclo o responsável pelo padrão metabólico da uva. No entanto, o sensor de fluorescência da clorofila pode não ter a sensibilidade suficiente para determinar as diferenças entre o índice de antocianinas das uvas cultivadas em diferentes solos.

3.1.2 Efeito dos solos na composição da uva e do vinho

De acordo com a Tabela 1, no ciclo 2013/2014, a evolução do teor antocianinas entre as classes de solos não ocorreu da mesma maneira: os maiores teores foram os detectados nas uvas cultivadas no Neossolo 2 e no Argissolo 2, e os menores, no Neossolo 1 integrado ao Argissolo 1. Essa distinção nos resultados se deve à diferenciação do comportamento das plantas localizadas no Cambissolo (ao Norte) e no Nessolo (ao Sul), o que evidencia variações extremas na zona de transição entre as classes de solos. As uvas dos Neossolos 2 e Argissolo 2, com maiores índices de antocianinas, estão localizadas em um local de maior altitude (600 a 610 m), o que pode ter alterado a síntese de antocianinas em relação aos demais solos que se encontravam em menor altitude. Nesse contexto, o maior índice de antocianinas no Neossolo 2 pode ainda estar relacionado com a baixa disponibilidade hídrica desse solo (Kennedy et al., 2001), o que estimula o acúmulo desse pigmento. Para os fenóis totais extraídos da película, os maiores teores foram obtidos nos Neossolos 1 e 2 (Tabela1). Conforme Chavarria et al. (2010), videiras cultivadas em Neossolos apresentam menor crescimento e rendimento e maiores teores de taninos e polifenóis totais em relação a outras classes de solos.

Tabela 1. Composição analítica de mosto e do vinho de acordo com o tipo de solo para o cilclo 2013/2014.

	Argissolo 1	Cambissolo	Neossolo 1	Neossolo 2	Argissolo 2
Composição do mosto					
Índice de Antocianinas	1,64±0,06b	1,67 ±0,06b	1,72±0,05ab	1,81±0,05a	1,8±0,1a
IPT (mg GAE.L^{-1})	1223±46b	1252±63b	1535±38a	1524±67a	1302±5b
Composição do Vinho					
Antocianinas (mg/L)	238±28a	245±1a	208±25ab	210±56ab	131±24b
IPT (mg GAE.100 g^{-1})	40±4a	34,60±0.01a	36±2a	39,9±2a	35,7±1,6a
Taninos (g/L)	0,71±0,08a	0,99±0,06a	0,67±0,02a	0,74±0,29a	0,76±0,12a
Intensidade de cor (DO 420 + DO 520)	0,43±0,04a	0,44±0,01a	0,48±0,04a	0,48±0,02a	0,41±0,02a
Matiz (DO 420/DO 520)	0,91±0,02b	0,90±0,02b	0,90±0,04b	0,96±0,03b	1,05±14a

Valores com letras diferents são significativamente diferentes por teste de Tukey ($p \leq 0,05$). SS: Sólidos Soluveis; TA: Acidez Titulável; IPT: índice de fenolicos totais.

Os teores de compostos fenólicos do Argissolo 1 e 2 e do Cambissolo não apresentaram diferenças entre si, indicando que, mesmo havendo variação entre as características desses solos, estas parecem não interferir nos teores de fenóis totais no momento em que as uvas foram colhidas. Nos vinhos ocorreram diferenças significativas entre as classes de solo com relação ao extrato seco, antocianinas e matiz, sendo o Argissolo 2 com os maiores valores de extrato seco e matiz, e um menor teor de antocianinas diferindo dos demais (Tabela 1). O teor de polifenóis totais (IPT), o teor de taninos totais e a intensidade de cor do vinho não foram afetados pela classe de solo em que a videira Merlot foi cultivada. Os valores relativamente elevados do matiz, para todas as classes de solo, evidenciam certo grau de oxidação da matéria corante, provavelmente pelo estado de maturação da uva.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que a mensuração do índice de antocianinas pelo método da fluorescência da clorofila pode predizer como está evoluindo a síntese de antocianinas em vinhedos da região do Vale dos Vinhedos, Bento Gonçalves/RS, Brasil da cultivar Merlot. Quanto ao índice de antocianinas, não foi possível verificar diferença entre as classes de solos nas principais datas de avaliação, ou seja, datas próximas à colheita. Verificou-se que nesse estudo a composição dos vinhos apresentou diferenças no extrato seco, teor de antocianinas e matiz.

Neste trabalho, são reconhecidas as importantes contribuições, incentivos e dedicação do Dr. Alberto Miele (in memoriam).

REFERENCIAS

AGATI, G.; D'ONOFRIO, C.; DUCCI, E.; CUZZOLA, A.; REMORINI, D.; TUCCIO, L.; LAZZINI, F.; MATTII, G. Potential of a multiparametric optical sensor for determining in situ the maturity components of red and white *Vitis vinifera* wine grapes. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. *61*, n. 50, p. 12211-12218, 2013. DOI: http://doi.org/10.1021/jf405099n.

ANESI, A.; STOCCHERO, M.; DAL SANTO, S.; COMMISSO, M.; ZENONI, S.; CEOLDO, S.; TORNIELLI, G. B.; SIEBERT, T. E.; HERDERICH, M.; PEZZOTTI, M.; GUZZO, F. Towards a scientific interpretation of the terroir concept: plasticity of the grape berry metabolome. **BMC Plant Biology**, v. *15*, n. 1, p. 191, 2015. DOI: http://doi.org/10.1186/s12870-015-0584-4.

BALUJA, J.; DIAGO, M. P.; GOOVAERTS, P.; TARDAGUILA, J. Assessment of the spatial variability of anthocyanins in grapes using a fluorescence sensor: relationships with vine vigour and yield. **Precision Agriculture**, v. *13*, n. 4, p. 457-472, 2012. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-012-9261-x.

BEN GHOZLEN, N.; MOISE, N.; LATOUCHE, G.; MARTINON, V.; MERCIER, L.; BESANCON, E.; CEROVIC, Z. G. Assessment of grapevine maturity using a new portable sensor: non--destructive quantification of anthocyanins. **Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin**, v. *44*, p. 1-8, 2010.

BETEMPS, D. L.; FACHINELLO, J. C.; GALARÇA, S. P.; PORTELA, N. M.; REMORINI, D.; MASSAI, R.; AGATI, G. Non-destructive evaluation of ripening and quality traits in apples using a multiparametric fluorescence sensor. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. *92*, n. 9, p. 1855-1864, 2012. DOI: http://doi.org/10.1002/jsfa.5552.

BRAMLEY, R. G. V.; LE MOIGNE, M.; EVAIN, S.; OUZMAN, J.; FLORIN, L.; FADAILI, E. M.; HINZE, C. J.; CEROVIC, Z. G. On-the-go sensing of grape berry anthocyanins during commercial harvest: development and prospects. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. *17*,

n. 3, p. 316-326, 2011. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00158.x.

CEROVIC, Z. G.; MOISE, N.; AGATI, G.; LATOUCHE, G.; BEN GHOZLEN, N.; MEYER, S. New portable optical sensors for the assessment of winegrape phenolic maturity based on berry fluorescence. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. *21*, n. 8, p. 650-654, 2008. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jfca.2008.03.012.

CHAVARRIA, G.; SANTOS, H. P. D.; ZANUS, M. C.; MARODIN, G. A. B.; CHALAÇA, M. Z.; ZORZAN, C. Maturação de uvas Moscato Giallo sob cultivo protegido. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. *32*, n. 1, p. 151-160, 2010. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-29452010005000014.

CHENG, G.; HE, Y. N.; YUE, T. X.; WANG, J.; ZHANG, Z. W. Effects of climatic conditions and soil properties on Cabernet Sauvignon berry growth and anthocyanin profiles. **Molecules (Basel, Switzerland)**, v. *19*, n. 9, p. 13683-13703, 2014. DOI: http://doi.org/10.3390/molecules190913683.

COZZOLINO, D. The role of visible and infrared spectroscopy combined with chemometrics to measure phenolic compounds in grape and wine samples. **Molecules (Basel, Switzerland)**, v. *20*, n. 1, p. 726-737, 2015. DOI: http://doi.org/10.3390/molecules20010726.

FERRER-GALLEGO, R.; HERNÁNDEZ-HIERRO, J. M.; RIVAS-GONZALO, J. C.; ESCRIBANO-BAILÓN, M. T. Determination of phenolic compounds of grape skins during ripening by NIR spectroscopy. **Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie**, v. *44*, n. 4, p. 847-853, 2011. DOI: http://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.12.001.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; FLORES, C. A.; MIELE, A. Relationships between A and B/A2 horizons of three soils in the context of viticulture. **Journal of Agricultural Studies**, v. *9*, n. 1, p. 440-454, 2021. DOI: http://doi.org/10.5296/jas.v9i1.18320.

FLORES, C. A.; PÖTTER, R. O.; SARMENTO, E. C.; WEBER, E. J.; HASENACK, H. **Os solos do Vale dos Vinhedos**. Brasília: Embrapa, 2012.

FRAGOSO, S.; ACENA, L.; GUASCH, J.; BUSTO, O.; MESTRES, M. Application of FT-MIR spectroscopy for fast control of red grape phenolic ripening. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. *59*, n. 6, p. 2175-2183, 2011. DOI: http://doi.org/10.1021/jf104039g.

GIOVENZANA, V.; CIVELLI, R.; BEGHI, R.; OBERTI, R.; GUIDETTI, R. Testing of a simplified LED based vis/NIR system for rapid ripeness evaluation of white grape (Vitis vinifera L.) for Franciacorta wine. **Talanta**, v. *144*, p. 584-591, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.06.055.

HAGEN, S. F.; SOLHAUG, K. A.; BENGTSSON, G. B.; BORGE, G. I. A.; BILGER, W. Chlorophyll fluorescence as a tool for non-destructive estimation of anthocyanins and total flavonoids in apples. **Postharvest Biology and Technology**, v. *41*, n. 2, p. 156-163, 2006. DOI: http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.04.003.

KAMMERER, D.; CLAUS, A.; CARLE, R.; SCHIEBER, A. Polyphenol screening of pomace from red and white grape varieties (Vitis vinifera L.) by HPLC-DAD-MS/MS. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. *52*, n. 14, p. 4360-4367, 2004. DOI: http://doi.org/10.1021/jf049613b.

KENNEDY, J. A.; HAYASAKA, Y.; VIDAL, S.; WATERS, E. J.; JONES, G. P. Composition of grape skin proanthocyanidins at different stages of berry development. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. *49*, n. 11, p. 5348-5355, 2001. DOI: http://doi.org/10.1021/jf010758h.

KING, P. D.; SMART, R. E.; MCCLELLAN, D. J. Within-vineyard variability in vine vegetative growth, yield, and fruit and wine composition of C abernet S auvignon in H awke's B ay, N ew Z ealand. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. *20*, n. 2, p. 234-246, 2014. DOI: http://doi.org/10.1111/ajgw.12080.

KUHN, N.; GUAN, L.; DAI, Z. W.; WU, B. H.; LAUVERGEAT, V.; GOMÈS, E.; LI, S.; GODOY, F.; ARCE-JOHNSON, P.; DELROT, S. Berry ripening: recently heard through the grapevine. **Journal of Experimental Botany**, v. *65*, n. 16, p. 4543-4559, 2013. DOI: http://doi.org/10.1093/jxb/ert395.

PARPINELLO, G. P.; NUNZIATINI, G.; ROMBOLÀ, A. D.; GOTTARDI, F.; VERSARI, A. Relationship between sensory and NIR spectroscopy in consumer preference of table grape (cv Italia). **Postharvest Biology and Technology**, v. *83*, p. 47-53, 2013. DOI: http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.03.013.

PEREIRA, G. E.; GAUDILLERE, J. P.; VAN LEEUWEN, C.; HILBERT, G.; MAUCOURT, M.; DEBORDE, C.; MOING, A.; ROLIN, D. 1H NMR metabolite fingerprints of grape berry: comparison of vintage and soil effects in Bordeaux grapevine growing areas. **Analytica Chimica Acta**, v. *563*, n. 1-2, p. 346-352, 2006. DOI: http://doi.org/10.1016/j.aca.2005.11.007.

RIBEREAU, P.; STONESTR, E. Dosage des tanins du vin rouge et détermination de leur structure. **Chimie Analytique**, v. 48, p. 188, 1966.

RIBÉREAU-GAYON, P.; STONESTREET, E. Phenolic compounds. In: RIBÉREAU-GAYON, P.; GLORIES, Y.; MAUJEAN, A.; DUBOURDIEU, D. (ed.). **Handbook of Enology:** the chemistry of wine stabilization and treatments. 2. ed. Hoboken: Willey, 2006. v. 2, p. 141-203. DOI: http://doi.org/10.1002/0470010398.ch6.

RODRÍGUEZ-PULIDO, F. J.; BARBIN, D. F.; SUN, D. W.; GORDILLO, B.; GONZÁLEZ-MIRET, M. L.; HEREDIA, F. J. Grape seed characterization by NIR hyperspectral imaging. **Postharvest Biology and Technology**, v. *76*, p. 74-82, 2013. DOI: http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2012.09.007.

ROSSI, R.; POLLICE, A.; DIAGO, M. P.; OLIVEIRA, M.; MILLAN, B.; BITELLA, G.; TARDAGUILA, J. Using an automatic resistivity profiler soil sensor on-the-go in precision viticulture. **Sensors**, v. 13, p. 1121-1136, 2013.

ROULLIER-GALL, C.; BOUTEGRABET, L.; GOUGEON, R. D.; SCHMITT-KOPPLIN, P. A grape and wine chemodiversity comparison of different appellations in Burgundy: vinta-

ge vs terroir effects. **Food Chemistry**, v. *152*, p. 100-107, 2014. DOI: http://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.056.

SCARLETT, N. J.; BRAMLEY, R. G. V.; SIEBERT, T. E. Within-vineyard variation in the 'pepper'compound rotundone is spatially structured and related to variation in the land underlying the vineyard. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. *20*, n. 2, p. 214-222, 2014. DOI: http://doi.org/10.1111/ajgw.12075.

SILVA, J. A.; DA COSTA, T. S.; LUCCHETTA, L.; MARINI, L. J.; ZANUZO, M. R.; NORA, L.; NORA, F. R.; TWYMAN, R. M.; ROMBALDI, C. V. Characterization of ripening behavior in transgenic melons expressing an antisense 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) oxidase gene from apple. **Postharvest Biology and Technology**, v. *32*, n. 3, p. 263-268, 2004. DOI: http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2004.01.002.

TUCCIO, L.; REMORINI, D.; PINELLI, P.; FIERINI, E.; TONUTTI, P.; SCALABRELLI, G.; AGATI, G. Rapid and non-destructive method to assess in the vineyard grape berry anthocyanins under different seasonal and water conditions. **Australian Journal of Grape and Wine Research**, v. *17*, n. 2, p. 181-189, 2011. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2011.00139.x.

WANG, R.; SUN, Q.; CHANG, Q. Soil types effect on grape and wine composition in Helan Mountain area of Ningxia. **PLoS One**, v. *10*, n. 2, p. e0116690, 2015. DOI: http://doi.org/10.1371/journal.pone.0116690.

YANG, Y. C.; SUN, D. W.; PU, H.; WANG, N.; ZHU, Z. Rapid detection of anthocyanin content in lychee pericarp during storage using hyperspectral imaging coupled with model fusion. **Postharvest Biology and Technology**, v. *103*, p. 55-65, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.02.008.

ZAMORA, F. El tanino enológico en la vinificación en tinto. **Enologos**, v. *25*, p. 26-30, 2003.

68

Recomendações para viticultura de precisão no Rio Grande do Sul

Recommendations for Precision Viticulture in Rio Grande do Sul State, Brazil

José Maria Filippini-Alba[1], Carlos Alberto Flores[2]

[1] *Pesquisador, Embrapa, Pelotas (RS), Brasil, jose.filippini@embrapa.br*
[2] *Pesquisador aposentado, Embrapa, Pelotas (RS), Brasil, cflores@terra.com.br*

RESUMO

A viticultura em escala comercial foi introduzida no século XIX no Rio Grande do Sul por imigrantes europeus, sendo incrementada e expandida no decorrer do tempo. A Rede de Agricultura de Precisão da Embrapa, iniciada em 2010, estabeleceu um formato de inovação no contexto da pesquisa, incluindo novas cadeias produtivas, equipamentos e parcerias. A Unidade Piloto de Uva para Vinho integrou três vinhedos pertencentes a uma empresa do setor, localizada no Vale dos Vinhedos, Bento Gonçalves/RS, Brasil. Os levantamentos se iniciaram em 2011 considerando diversas tecnologias, sendo os resultados expostos por meio de publicações diversas e apresentações em eventos. Esses resultados e conceitos extraídos de publicações sobre o assunto foram condensados neste capítulo, na tentativa de orientar o setor produtivo sobre a aplicação de viticultura de precisão (VP) no contexto das principais regiões vinícolas do estado.

Palavras-chave: agricultura; sensor; solo; uva; vinhedo; vinho.

ABSTRACT

Viticulture on a commercial scale was introduced in the 19th century in Rio Grande do Sul state, Brazil, by European immigrants, and has been increased and expanded over time. Embrapa Precision Agriculture Network, which began in 2010, has established an innovation format in the context of research, including new production chains, equipment and partnerships. The Wine Grape Pilot Unit comprised three vineyards belonging to a company in the sector, located in the Vale dos Vinhedos, Bento Gonçalves-RS, Brazil. The surveys began in 2011 considering various technologies, and the results have been presented in various publications and presentations at events. These results along with thematic concepts were condensed in this chapter, aiming to guide the productive sector on the application of precision viticulture (PV) in the context of the state's main wine-growing regions.

Keywords: agriculture; grape; sensor; soil; vineyard; wine.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000042

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão (AP) pode ser definida como uma técnica de manejo do solo por sítio-específico que considera amostragem intensiva, procedimentos de modelagem de dados e, segundo alguns autores, trata-se do maior processo científico relacionado com agricultura dos finais do século XX (Mermut; Eswaran, 2001). No entanto, diversas definições de AP utilizam na atualidade a expressão "postura gerencial" e consideram termos relacionados com variabilidade espacial ou temporal (Filippini-Alba; Zanella, 2016). Já Ammoniaci et al. (2021) indicam que as bases científicas da AP foram desenvolvidas nos anos 1980 induzidas por quatro fatores principais:

1) Custo e precisão dos sistemas globais de navegação por satélite (SGNS).
2) Desenvolvimento dos sistemas de informação geográfica (SIG).
3) Aumento da disponibilidade de imagens orbitais georreferenciadas.
4) Desenvolvimento das tecnologias de taxa variável.

Outrossim, os autores mencionam que a viticultura de precisão (VP) demorou a acontecer em relação a outras culturas. É importante considerar que, dentre diversas causas para essa demora, assume maior relevância a correlação entre VP e o conceito de terroir, um dos grandes atributos de valor e diferenciação da cadeia vitivinícola. Haynes (1999) considera o terroir como todos os fatores abaixo e acima do solo que afetam o desenvolvimento da uva, como clima, geologia, o próprio solo, relevo e procedimentos de vitivinicultura, descartando aspectos biológicos como pestes, doenças e ervas daninhas. Bramley e Hamilton (2007) discutiram a compatibilidade entre os conceitos de terroir e VP, apontando a possibilidade de um aprimoramento da qualidade por meio da VP. Mas há poucas publicações relacionadas ao tema no Brasil, destacando-se os trabalhos associados à rede de AP da Embrapa, no Vale dos Vinhedos (Bernardi et al., 2014) e aqueles relacionados ao conceito de terroir, em outras regiões vinícolas – RS (Hoff et al., 2010, 2017, 2018).

Considerando microvinificações independentes de uvas da mesma cultivar, coletadas em cinco classes de solos em área piloto da rede de AP da Embrapa no Vale dos Vinhedos, junto à Serra Gaúcha, Bento Gonçalves/RS, Miele et al. (2014) observaram composições diferentes para cinco vinhos finos, em termos de coloração e conteúdo de antiocianinas, polifenóis e taninos. Van Leeuwen et al. (2018) avaliaram solos classificados conforme o Referencial Francês de Pedologia, por meio de um índice de qualidade relacionado com vinhos finos, em Bordeaux, França. Quatro classes de solos apresentaram índice de alta qualidade e três classes de solos apresentaram índice de baixa qualidade. Entre os primeiros ocorreram um Planossolo com sub-horizonte argiloso e solos arenosos e/ou cascalhentos com boa drenagem. Por outro lado, um Luvissolo e solos arenosos coluviais ou com camada permanente de água apresentaram baixos índices de qualidade. Várias considerações foram realizadas sobre aspectos minerais, teor de nitrogênio e influência da água, destacando-se que o manejo deve ser diferenciado no caso de vinhos tintos e brancos.

Neste capítulo serão realizadas recomendações sobre manejo relacionado à viticultura de precisão (VP) com base nos trabalhos da Rede de AP da Embrapa na Unidade Piloto de Uva para Vinho no Vale dos Vinhedos (Upuve), Bento Gonçalves/RS, já publicados, com orientação predominante para as características do solo. Inicialmente serão considerados métodos de amostragem e de determinação das zonas de manejo, continuando com uma discussão sobre atributos de solo e planta, finalizando com algumas sugestões para as demais regiões vinícolas do estado do Rio Grande do Sul, levando em consideração as características geográficas específicas em cada caso.

2 REGIÕES VINÍCOLAS DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Conforme Tonietto et al. (2012), as regiões vinícolas do Rio Grande do Sul são:

1) A Serra Gaúcha
2) A Serra do Sudeste
3) A Região da Campanha Gaúcha
4) Os Campos de Cima da Serra

A Serra Gaúcha é a região vinícola mais antiga do Brasil e localiza-se no nordeste do estado, entre as latitudes 28°30' S a 29°24' S e as longitudes 50°37' O e 52° O, com altitudes de 400 m a 700 m e área total de 8087 km^2. O clima é temperado úmido quente com noites temperadas, sendo os basaltos as rochas dominantes. Encruzilhada do Sul e Pinheiro Machado integram a região vinícola Serra do Sudeste, localizada a aproximadamente 130 km ao sul de Porto Alegre, entre as latitudes 30°20' S e 32° S, longitudes de 53°40' O e 52°40' O, altitudes variando entre 300 m e 450 m, com um total de 7.000 km^2. Seu clima é semelhante ao da região precedente, porém com menos chuvas, mas na perspectiva geológica predominam granitos, onde ocorrem Argissolos, Cambissolos, Luvissolos, Neossolos e Planossolos (Cunha et al., 2005). Os Argissolos são identificados pelo maior teor de argila nos horizontes subsuperficiais em relação aos superficiais. Os Cambissolos possuem horizonte B incipiente e associam-se aos Neossolos, que são rasos

e sem horizonte B. Já os Planossolos possuem textura predominantemente arenosa em superfície, com grande aumento de argila em subsuperfície e mudança textural abrupta ou transição abrupta com gradiente textural. São adensados em subsuperfície e extremamente duros quando secos (Embrapa, 2022).

Maior em extensão, com 35.701 km^2, a Campanha Gaúcha corre como uma faixa de 30-60 km de largura, adjacente à fronteira Brasil-Uruguai, localizada entre as latitudes 29°24' S e 31°48' S, longitudes no intervalo 53° O a 57°46' O e altitudes de 30 m a 230 m. O clima é quente e úmido com noites temperadas, e sua pedologia e geologia são diversificadas em função do vasto território. Finalmente, os "Campos de Cima da Serra" localizam-se no nordeste do estado, adjacentes a borda sul de Santa Catarina, entre latitudes 27°50' S e 28° S, longitudes de 50°30' O a 51°32' O, altitudes acima de 900 m e área total de 4.740 km^2. O clima é temperado úmido com noites frias, a geologia é dominada por basaltos e os principais solos são Cambissolo, Neossolo e Latossolo.

Pedron (2007) estudou os Neossolos gaúchos derivados de rochas vulcânicas conforme cinco perfis localizados em Itaqui, Unistalda, Ibarama, Caxias do Sul e Bom Jesus. As características granulométricas sugeriram que o processo de transferência de argila para os horizontes subsuperficiais se sobrepôs à formação de argila pelo intemperismo, destacando a influência de clima e geologia sobre o complexo de troca. As rochas correspondentes aos perfis em Caxias do Sul e Bom Jesus apresentaram características félsicas (riolitos e riodacitos), com predomínio de quartzo, feldspato-K, muscovita e biotita. Já os outros três perfis apresentaram características máficas, conforme basaltos, predominando minerais como piroxênio, olivina, magnetita-maghemita e plagioclásios. Os saprolitos mostraram maior conteúdo de gibbsita nos perfis basálticos e ocorrência de maior conteúdo de caulinita para as rochas félsicas.

3 CARACTERÍSTICAS DA UNIDADE PILOTO DE UVA PARA VINHO DA REDE DE AP DA EMBRAPA

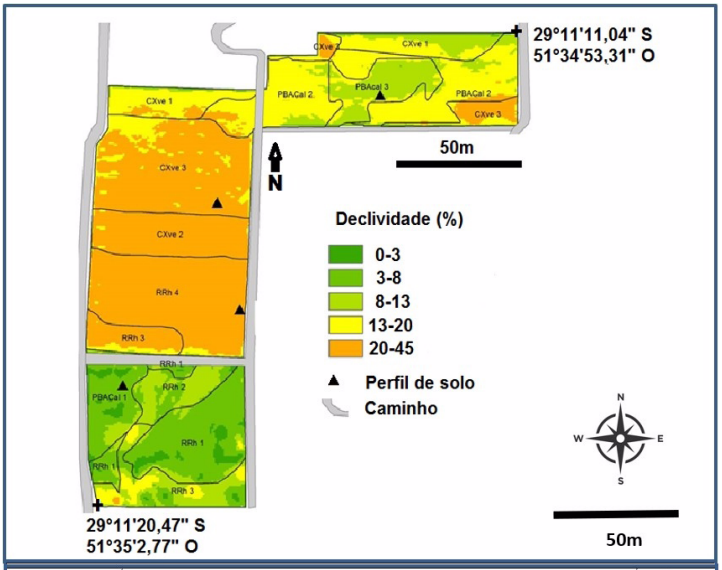
A Upuve está localizada em Bento Gonçalves/RS, no Vale dos Vinhedos, o que representa uma pequena parte da Serra Gaúcha, composta por três vinhedos comerciais, que no seu conjunto formam um "L" (Figura 1). O vale possui geomorfologia complexa com contrastes significativos de altitude, declividade e exposição solar, com 14,2% de área ocupada por solos planos e suavemente ondulados e 58,2% da área ocupados por solos ondulados ou fortemente ondulados (Flores et al., 2012). Argissolos, Cambissolos e Neossolo ocorrem em 31,1%, 48,4% e 13,4% da área, respectivamente.

Como pode ser observado na Figura 1, o vinhedo 1 encontra-se ao norte, com extensão S-N de quase 40 m e comprimento L-O de 100 m, altitude média de 564 m, declividade de 8 a 20% e predomínio de Argissolos Bruno-Acinzentados Alíticos abrúpticos (PBAcal2/3) na parte central e Cambissolos Háplicos (CXve1/3) nas margens. Já o vinhedo 2, possui largura L-O de 60 m e comprimento S-N de 100 m e aumenta sua declividade até 45% no sentido sul, alcançando altitude de 585 m, onde ocorrem Cambissolos Háplicos Eutróficos típicos com transição para Neossolo Regolítico Húmico típico (RRh 4) no terço final do vinhedo. O vinhedo 3, de forma quadrada, no extremo sul da área, eleva-se até 595 m, com declividade 3% a 20% e predomínio de Neossolo Regolítico Húmico típico com mancha de Argissolo Bruno-Acinzentado Alítico típico a noroeste. Os quatro perfis de solo utilizados para a caracterização taxonômica foram localizados nas unidades PBAcal 1, PBAcal 3, CXve 3 e RRh 3.

4 AMOSTRAGEM

O uso de malha regular para avaliar a variabilidade espacial tem sido amplamente difundido em AP; no entanto, alguns autores criticam esse procedimento, recomendando o uso de amostragem irregular inteligente baseada nas classes de solos, mudanças no microrrelevo, manchas de cor ou textura ou levantamentos com sensores manuais, ou por meio de veículos aéreos não tripulados ou imagens orbitais de alta resolução (Bramley; Trengove, 2013). Uma explicação para a ineficiência das malhas regulares superficiais para representar a variabilidade espacial derivaria da profundidade de amostragem e da distância inter-amostras. Arbustos e árvores, usualmente relacionados com fruticultura, possuem sistema radicular de maior penetração, assim as raízes alcançam os horizontes profundos com facilidade, caso não haja impedimentos. Já a distância inter-amostras deverá ser curta para pomares ou lavouras com grande variabilidade espacial, ou seja, usualmente relacionada com relevo íngreme ou com a ocorrência de várias classes de solos.

A lei de distribuição de Student aproxima-se da lei de distribuição normal ou gaussiana, para número de amostras igual ou superior a 30, limiar crítico para estudos estatísticos. Uma regra prática da geoestatística sugere que para se ter um bom mapa são necessários 100 pontos de amostragem, quando se avalia o número de pares de pontos possíveis para uma, duas, três ou mais distâncias inter-amostras, pois poderá acontecer imprecisão do semivariograma para dis-



Unidade	Descrição	Área (ha)
PBACal 1	Argissolo Bruno Acinzentado Alítico típico A moderado textura argilosa fase relevo suave ondulado.	0.13
PBACal 2	Argissolo Bruno Acinzentado Alítico abrúptico A proeminente textura franco argiloso/argilosa fase relevo moderadamente ondulado.	0.12
PBACal 3	Argissolo Bruno Acinzentado Alítico abrúptico A proeminente textura franco argiloso/argilosa fase relevo ondulado.	0.38
CXve 1	Cambissolo Háplico Ta Eutrófico típico A moderado textura franco argiloso/argilosa fase relevo ondulado.	0.19
CXve 2	Cambissolo Háplico Ta Eutrófico típico A moderado textura franco argiloso/argilosa fase relevo ondulado.	0.47
CXve 3	Cambissolo Háplico Ta Eutrófico típico A moderado textura franco argiloso/argilosa fase pedregosa relevo forte ondulado.	0.18
RRh1	Neossolo Regolítico Húmico típico franco argilo-arenoso/franco fase pedregosa relevo suave ondulado.	0.29
RRh 2	Neossolo Regolítico Húmico típico franco argilo-arenoso/franco fase pedregosa relevo moderadamente ondulado.	0.10
RRh 3	Neossolo Regolítico Húmico típico franco argilo-arenoso/franco fase pedregosa relevo ondulado.	0.21
RRh 4	Neossolo Regolítico Húmico típico franco argilo-arenoso/franco fase pedregosa relevo forte ondulado.	0.35

Figura 1. Mapa de solos da unidade piloto da Rede de Agricultura de Precisão (AP) da Embrapa (Upuve) e declividade associada, Embrapa (2022).

tâncias inter-amostras maiores devido à redução do número de pares. Assim, distâncias inter-amostras de 10 m seriam necessárias para áreas de 1 ha e de 20 m para áreas de 4 ha.

Um estudo na Upuve comparou a eficiência do mapa de solos em relação à malha regular com passo de 20 m, para avaliar a variabilidade espacial (Filippini-Alba et al., 2017). Em 2,4 ha foram definidas 10 classes de solos considerando Argissolos, Cambissolos e Neossolos com altitudes e declividades diferenciadas. Os autores concluíram que o tipo de solo e suas variáveis físicas afetam a circulação da água nos horizontes do solo, sendo que a malha regular é mais adequada para analisar a variabilidade horizontal, enquanto que na classificação taxonômica dos solos prevalece a variabilidade vertical.

Filippini-Alba et al. (2021) compararam dados de variáveis físicas e conteúdo de elementos químicos dos horizontes superficial e subsuperficial da Upuve. Os conteúdos de Al e P apresentaram valores extremos no horizonte superficial, com enriquecimento desse horizonte em relação ao horizonte subsuperficial, para C orgânico, N, Ca, Mg, Na, K e P, no geral, inclusive depois da eliminação dos valores extremos. Assim, o conteúdo de Al caiu para quase zero no horizonte superficial[1], mantendo valores médios para os horizontes subsuperficiais. Os autores concluíram que o horizonte superficial dos vinhedos é afetado pelas operações de manejo, recomendando-se trabalhar com os horizontes subsuperficiais para procedimentos de VP, que se adaptam melhor às características das vinhas.

5 ZONAS DE MANEJO

Luchiari Junior et al. (2000) conceituam zonas de manejo como áreas do terreno iguais na perspectiva de potencial de produção, eficiência do uso de insumos e risco de impacto ambiental. Na Upuve foram definidas cinco zonas de manejo com base no levantamento de solos (Flores et al., 2011).

[1] Provavelmente devido à adição de calcário nesse horizonte.

Filippini-Alba et al. (2012) integraram, por meio de SIG, os conteúdos de argila, matéria orgânica e saturação de bases no vinhedo 2, especializados por meio de métodos geoestatísticos e classificados conforme sua aptidão agrícola, considerando a classe Preferencial, Recomendada, Pouco Recomendada e Não Recomendada conforme: Argila = 15-35%, 35-60%, < 15% ou > 60%, orgânica; Matéria orgânica = 0-0,5%; 0,5-1,5%; 3,5-5%, > 5%; Saturação de bases = 20-49%, 50-80%, < 20% ou > 80%, ocorrência de sais. A sobreposição considerando lógica Fuzzy derivou em duas manchas da classe Preferencial, a maior relacionada aos Cambissolos 2 e 3, e a menor relacionada à classe Neossolo 3, porém não existiu coincidência perfeita com a delimitação das classes de solo.

Existiram diferenças com as zonas definidas pela análise de clusters conforme os atributos do solo (Filippini-Alba et al., 2014) ou considerando métodos de classificação e integração em SIG (Filippini-Alba et al., 2017). Os procedimentos considerando SIG definiram quatro zonas de manejo, com adequada sobreposição em dois vinhedos em relação ao estudo anterior, mas com pouca coincidência para o maior vinhedo, que apresenta uma variação marcante de altitude e declividade quando comparado aos outros dois. Miele et al. (2014) processaram uvas colhidas de vinhedos situados em cinco classes de solos, conforme o mapa de solos da Upuve, sendo elaborados cinco vinhos por microvinificação. Existiram diferenças de cor e conteúdo de antocianinas, polifenóis e taninos entre os vinhos processados, conferindo a ocorrência de pelo menos cinco zonas de manejo.

A condutividade elétrica aparente do solo (CEAS) é uma propriedade relacionada à textura, à umidade, ao conteúdo de sais e à pedregosidade ou rochosidade. Considerando um protótipo portátil desenvolvido no contexto da Rede de AP da Embrapa (Rabello; Inamasu, 2014), foram realizadas medidas de CEAS em duas profundidades, CEr e CEp, condutividade elétrica rasa (0-20cm) e profunda (0-40cm), respectivamente, na Upuve. Os resultados foram associados às classes de solo, sugerindo a existência de sete respostas diferentes envolvendo as variáveis físicas, ou seja, sete zonas de manejo, com o sombreamento indicando resposta semelhante (Tabela 1). No entanto, a classe Neossolo 2, muito embora com resposta diferente para a CEr, para efeitos práticos, poderia ser integrada com Neossolo 1 e Neossolo 3. Assim, as zonas de manejo seriam: (1) CXve 1; (2) CXve 2/3; (3) PBAcal 1; (4) PBAcal 2; (5) PBAcal 3; (6) RRh 1/2/3; e (7) RRh 4. Essas zonas de manejo têm semelhanças com as mencionadas no parágrafo precedente, porém sem uma completa coincidência.

6 AVALIANDO OS ATRIBUTOS DE SOLO E PLANTA

Flores et al. (2009) apontam que o clima do solo e a dinâmica da água são influenciados significativamente pelo relevo, em função da incidência diferenciada da radiação solar, segundo a inclinação e a posição das vertentes, e do decréscimo da temperatura com o aumento da altitude, e indiretamente, sobre os seres vivos, especialmente os tipos de vegetação natural, que são dependentes das condições climáticas locais. O relevo regula os movimentos da água ao longo da vertente, tanto na superfície como no interior do solo, agindo sobre seu regime hídrico e, consequentemente, sobre os fenômenos de percolação

Tabela 1. Variáveis físicas associadas às classes de solo da Upuve, Vale dos Vinhedos/ Bento Gonçalves, RS.

Classe	NN	Altitude	Declividade	CEr	CEp	DPr	DPp
CXve 1	21	566m	13-20%	87%	78%	2,9	1,8
CXve 2	24	578m	20-45%	68%	100%	2,7	2,3
CXve 3	48	574m	20-45%	80%	98%	3,0	1,9
PBAcal 1	15	596m	3-8%	79%	99%	3,4	2,3
PBAcal 2	29	563m	8-13%	76%	100%	2,9	2,0
PBAcal 3	12	560m	12-20%	35%	88%	3,2	2,0
RRh 2	10	589m	8-13%	78%	52%	2,0	1,3
RRh 1	24	595m	3-8%	59%	48%	2,2	1,7
RRh 3	17	593m	13-20%	55%	38%	1,8	1,2
RRh 4	38	588m	20-45%	69%	80%	3,1	1,9

NN: número de determinações; CE: condutividade elétrica; DP: desvio padrão; r: raso; p: profundo.
Fonte: Embrapa, 2022.

interna, lixiviação de solutos, transporte de partículas coloidais e, ainda, naqueles fenômenos em que a presença da água é imprescindível, isto é, hidrólise, hidratação e dissolução. Existe uma menor tendência à infiltração em áreas íngremes devido ao aumento da velocidade do fluxo da água.

MacMillan et al. (2000) destacaram uma abordagem robusta considerando a caracterização e segmentação de unidades geomorfológicas, que foi desenvolvida no Canadá, com potencial para utilização em AP. Considerando variáveis derivadas do modelo digital de elevação e critérios baseados em lógica Fuzzy, foram identificadas 15 unidades geomorfológicas diferenciadas. Além das dez classes de solos, a Upuve caracteriza-se por uma variação de altitude e declividade significativas em curta distância. Filippini-Alba et al. (2021) acharam maior acumulação de elementos químicos nos solos com relevo suave ondulado e ondulado em relação aos solos fortemente ondulados nesses vinhedos.

Os índices de vegetação são razões de bandas do tipo (infravermelho - vermelho) sobre (infravermelho + vermelho) ou (infravermelho - verde) sobre (infravermelho + verde) ou infravermelho sobre vermelho, que têm sido utilizados de maneira frequente em VP, principalmente por meio de veículos aéreos não tripulados (Giovos et al., 2021). São utilizados para predizer o estágio de desenvolvimento das plantas, videiras no caso, ou avaliar seus atributos, como o estrese hídrico ou a área foliar. As medidas podem ser realizadas por plataformas orbitais ou aéreas ou tecnologias embarcadas, que geralmente envolvem vários sensores proximais, que poderão evoluir para o uso de robótica em contexto futuro (Matese; Di Gennaro, 2015). Os sensores também podem ser usados individualmente de maneira portátil, como no exemplo mencionado anteriormente para CEAS. Para o manejo em VP, em função do tamanho do dossel das videiras, recomenda-se o uso de imagens de alta resolução, com pixel de 1 m^2 ou inferior, em vez de imagens de resolução moderada, tipo Aster, Centinel, Landsat etc. O uso de sensores hiperespectrais, que envolvem um grande número de bandas de poucos comprimentos de onda parece direcionado para aplicações acadêmicas, envolvendo determinação de moléculas por sensoriamento remoto ou proximal.

Na Upuve não foram efetuadas medidas de índice de vegetação; no entanto, foi efetuado um monitoramento com o sensor de fluorescência de clorofila Multiplex®, para medir o teor de antocianinas nos grãos de uva, nos ciclos agrícolas 2013/2014 e 2014/2015 (Crizel et al., 2013). Sensores do tipo são chamados de proximais e permitem a análise de materiais diversos por meio de uma calibração por método independente (Kardeván, 1997). Para calibrar o sensor para medição do teor de antocianinas em uvas Merlot foram usadas quatro plantas marcadas após o véraison (50% de desenvolvimento de cor) com determinação do teor de antocianinas pelo método destrutivo convencional. O coeficiente de determinação entre os métodos foi de 0,9, o que representa 90% de eficiência na determinação do teor de antocianinas. Os dados levantados semanalmente foram espacializados por métodos geoestatísticos, sendo que a observação das imagens permitiu avaliar com precisão a melhor data para a colheita.

As redes de sensores sem fios podem ser utilizadas para monitoramento remoto e em tempo real em vinhedos, incluindo medidas de temperatura e umidade em diferentes níveis, como copa ou solo. Trata-se de uma rede de dispositivos autônomos contendo sensores, denominados nodos, distribuídos espacialmente para monitorar um fenômeno físico. Os nodos são distribuídos pelo vinhedo para medir a variabilidade espacial e podem se comunicar entre si, sem a necessidade de uma estação base ou diretamente com um portal (*gateway*). Os sensores de rendimento baseados na medição volumétrica da uva na esteira de descarga da vindima constituem mais um exemplo (Matese; Di Gennaro, 2015). Uma rede sem fio, denominada ZigBee, foi instalada no Douro, Portugal, para aplicações fotovoltaicas, monitoramento da umidade relativa, umidade do solo, temperatura do ar e do solo, velocidade e direção do vento e irradiação do solo (Morais et al., 2008).

7 CONCLUSÕES

A amostragem irregular inteligente com apoio de métodos convencionais de mapeamento do solo ou obtenção de big data por meio de sensores de condutividade elétrica ou ópticos com captação orbital de alta resolução ou aérea (UAVs) ou, ainda, por tecnologias mais avançadas, apresentam-se como as soluções mais adequadas para manejo de viticultura de precisão (VP). A coleta de horizontes subsuperficiais é recomendada devido à natureza do sistema radicular das videiras, pois a avaliação dos atributos de solo e planta em diferentes profundidades poderá conduzir a resultados aprimorados. O decorrer do processo, que iniciou com o uso de equipamentos portáteis, passando por diversos estágios de tecnologia embarcadas, incluindo os veículos aéreos não tripulados, poderá evoluir para o uso de robótica no futuro. Porém, existem barreiras técnicas e econômico-financeiras que devem ser vencidas.

Ammoniaci et al. (2021) mencionam sustentabilidade dos procedimentos de VP a partir de vinhedos com área mínima de 20 ha, sendo que Mondino e Gajeti (2017) incrementam a área para 40 ha quando considerados métodos relacionados com veículos aéreos não tripulados. Isso sugere dificuldades para a aplicação de VP no terreno declivoso do Vale dos Vinhedos, com pequenos vinhedos, sendo que, nesse quesito, a situação parece mais vantajosa na Serra do Sudeste com vinhedos de maior tamanho (Hoff et al., 2010), que aumentam sua área na Campanha Gaúcha devido à paisagem suave-ondulada (Hoff et al., 2017, 2018). As diferenças climáticas entre as regiões vinícolas são muito importantes quanto à questão enológica, não tanto na perspectiva de VP. Os solos predominantes na Upuve são Argissolos, Cambissolos e Neossolos que também ocorrem na Serra do Sudeste, junto com Luvissolos e Planossolos. No entanto, os materiais de origem são diferentes, pois ocorrem rochas vulcânicas ácidas na Serra Gaúcha e rochas graníticas na Serra do Sudeste.

O conceito de terroir tem um forte componente regional, entretanto, na perspectiva de VP, quando o nível de detalhamento é maior, se há disponibilidade do mapa de solos em escala 1:5000 ou superior, por praticidade, ele deve ser utilizado para definir as zonas de manejo. De outra forma, uma solução simples para essa questão pode ser representada pela integração em SIG de variáveis físicas como cor de camada, profundidade, textura dos horizontes superficiais e subsuperficiais, declividade e altitude. De qualquer maneira, essas zonas devem ser consideradas para microvinificações (Miele et al., 2014), derivando em um ajuste do modelo inicial, se necessário, com base na qualidade dos vinhos produzidos. No caso de existir preferência para produção da uva para consumo in natura, a qualidade do fruto, a produtividade ou outros atributos de planta poderão orientar o processo (Nascimento et al., 2014).

Neste trabalho, são reconhecidas as importantes contribuições, incentivos e dedicação do Dr. Alberto Miele (in memoriam).

REFERÊNCIAS

AMMONIACI, M.; KARTSIOTIS, S. P.; PERRIA, R.; STORCHI, P. State of art of monitoring Technologies and Data Processing for precision viticulture. **Agriculture**, v. *11*, n. 3, p. 201-220, 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/agriculture11030201.

BERNARDI, A. D. C.; NAIME, J. D. M.; RESENDE, A. D.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. **Agricultura de Precisão:** *resultados de um novo olhar.* Brasília: Embrapa, 2014. 596 p.

BRAMLEY, R. G. V.; HAMILTON, R. P. Terroir and precision viticulture: are they compatible? **OENO One**, v. *41*, n. 1, p. 1-8, 2007. DOI: http://doi.org/10.20870/oeno-one.2007.41.1.855.

BRAMLEY, R.; TRENGOVE, S. Precision agriculture in Australia: present status and recent developments. **Engenharia Agrícola**, v. *33*, n. 3, p. 575-588, 2013. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-69162013000300014.

CRIZEL, G. R.; FERREIRA, W. A.; ROMBALDI, C. V.; RITSCHEL, P.; GIRARDI, C. Determinação de antocianinas totais em uvas de vinho, suco e de mesa através de método não destrutivo. In: JORNADA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA, 11., 2013, Bagé. **Anais** [...]. 2013. Bagé: Urcamp, 2013. 10 p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S.; PINTO, L. F. S.; MENDES, R. G.; SILVA, J. B.; DUARTE, L. R.; SCHUMACHER, R. L. **Estudo de solos de Encruzilhada do Sul – RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2005. 74 p.

EMBRAPA. **Solos brasileiros**. 2022. Disponível em: https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil. Acesso em: 10 maio 2022.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; FLORES, C. A.; MIELE, A. Geotechnologies and soil mapping for delimitation of management zones as an approach to precision viticulture. **Applied and Environmental Soil Science**, v. *2017*, p. 4180965, 2017. DOI: http://doi.org/10.1155/2017/4180965.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; FLORES, C. A.; MIELE, A. Modelagem espacial dos solos para apoio à viticultura de precisão: Vale dos Vinhedos, Serra Gaúcha, Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Viticultura e Enologia**, v. *4*, p. 8-17, 2012.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; FLORES, C. A.; MIELE, A.; VILLANI, L. M. SIG para a gestão vitivinícola no Vale dos Vinhedos. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (eds.). **Agricultura de Precisão:** *resultados de um novo olhar.* Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 370-375.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; ZANELLA, M. **Revisão e processamento de informações sobre agricultura de precisão no Brasil**. Pelotas: Embrapa, 2016. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1070875/revisao-e-processamento-de-informacoes-sobre-agricultura-de-precisao-no-brasil. Acesso em: 20 jan. 2020.

FILIPPINI-ALBA, J. M.; FLORES, C. A.; MIELE, A. Relationships between A and B/A2 horizons of three soils in the context of viticulture. **Journal of Agricultural Studies**, v. *9*, n. 1, p. 440-454, 2021. DOI: http://doi.org/10.5296/jas.v9i1.18320.

FLORES, C. A.; FILIPPINI ALBA, J. M.; LEVIEN, H. F.; ZARNOTT, D. H.; MIELE, A.; PAVAN, C. Levantamento detalhado dos solos e a viticultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., 2011, Uberlândia. **Anais** [...]. Uberlândia: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011.

FLORES, C. A.; GARRASTAZU, M. C.; ALBA, J. M. F. **Metodologia de zoneamento edáfico de culturas para o estado do Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa, 2009, 45p. (Embrapa Clima Temperado, Documentos, 261).

FLORES, C. A.; PÖTTER, R. O.; SARMENTO, E. C.; WEBER, E. J.; HASENACK, H. **Os solos do Vale dos Vinhedos**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2012. 175 p.

GIOVOS, R.; TASSOPOULOS, D.; KALIVAS, D.; LOUGKOS, N.; PRIOVOLOU, A. Remote sensing vegetation indices in viticulture. A critical review. **Agriculture**, v. *11*, n. 5, p. 457-476, 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/agriculture11050457.

HAYNES, S. Geology and wine 1. Concept of terroir and the role of geology. **Geoscience**, v. *26*, n. 4, p. 190-194, 1999.

HOFF, R.; DUCATI, J. R.; BERGMANN, M. Geologic and geomorphologic features applied for identification of wine terroir units by digital image processing, spectroradiometric and GIS techniques in Encruzilhada do Sul, RS, Brazil. In: INTERNATIONAL AL TERROIR CONGRESS, 8., 2010, Soave. **Proceedings** [...]. Soave: Congress Terroir, 2010.

HOFF, R.; DUCATI, J. R.; FARIAS, A. R. GIS and remote sensing to support precision viticulture for analysis of vineyards in the Campanha wine region, Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. *10*, p. 20-32, 2017.

HOFF, R.; FALCADE, I.; BERGMANN, M.; ALBERTI, R.; MODENA, R. C. C.; DALCIN, M. Geologia, geomorfologia e paisagem vitícola: uma abordagem de identidade regional da viticultura na região vitícola Campanha, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. *19*, n. 4, p. 757-776, 2018. DOI: http://doi.org/10.20502/rbg.v19i4.1388.

KARDEVÁN, P. Reflectance spectroradiometer – a new tool for environmental mapping. **Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences**, v. *2*, p. 29-38, 1997.

LUCHIARI JUNIOR, A.; SHANAHAN, J.; FRANCIS, D.; SCHLEMMER, M.; SCHEPERS, J.; LIEBIG, M. Strategies for establishing management zones for site speci c nutrient management. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, Minneapolis*. **Proceedings** [...]. Minneapolis: University of Minnesota, 2000.

MACMILLAN, R. A.; PETTAPIECE, W. W.; NOLAN, S. C.; GODDARD, T. W. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. **Fuzzy Sets and Systems**, v. *113*, n. 1, p. 81-109, 2000. DOI: http://doi.org/10.1016/S0165-0114(99)00014-7.

MATESE, A.; DI GENNARO, S. F. Technology in precision viticulture: a state of the art review. **International Journal of Wine Research**, v. *7*, p. 69-81, 2015. DOI: http://doi.org/10.2147/IJWR.S69405.

MERMUT, A. R.; ESWARAN, H. Some major developments in soil science since the mid-1960s. **Geoderma**, v. *100*, n. 3-4, p. 403-426, 2001. DOI: http://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00030-1.

MIELE, A.; FLORES, C. A.; FILIPPINI ALBA, J. M.; BADALOTTI, C. Efeito do tipo de solo nos compostos fenólicos e na atividade antioxidante do vinho. **Revista Brasileira de Viticultura e Enologia**, v. *6*, p. 40-47, 2014.

MONDINO, E. B.; GAJETI, M. Preliminary considerations about costs and potential market of remote sensing from UAV in the Italian viticulture context. **Yaogan Xuebao**, v. *50*, n. 1, p. 310-319, 2017.

MORAIS, R.; FERNANDES, M. A.; MATOS, S. G.; SERÔDIO, C.; FERREIRA, P. J. S. G.; REIS, M. J. C. S. A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *62*, n. 2, p. 94-106, 2008. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2007.12.004.

NASCIMENTO, E. P.; NASCIMENTO, P. D. S.; SILVA, J.; COSTA, B.; BASSOI, L. Contagem de cachos para estimativa da produtividade em pomar de videira de mesa. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (eds.). **Agricultura de Precisão:** *resultados de um novo olhar*. Brasília: Embrapa, 2014, p. 376-381.

PEDRON, F. A. **Mineralogia, morfologia e classificação de saprolitos e neossolos derivados de rochas vulcânicas no Rio Grande do Sul**. 2017. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Conductividade elétrica aparente do solo. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (eds.). **Agricultura de Precisão:** *resultados de um novo olhar*. Brasília: Embrapa, 2014, p. 48-57.

TONIETTO, J.; SOTÉS-RUIZ, V.; GÓMEZ-MIGUEL, V. D. **Clima, zonificación y tipicidade del vino en regiones vitivinícolas Ibero-americanas**. Madrid: CYTED, 2012, 411 p.

VAN LEEUWEN, C.; ROBY, J. P.; RESSÉGUIER, L. Soil-related terroir factors: a review. **OENO One**, v. *52*, n. 2, p. 173-188, 2018. DOI: http://doi.org/10.20870/oeno-one.2018.52.2.2208.

Seção 4

Pecuária

Seção Pecuária

O Brasil é um dos principais produtores mundiais de carne e leite bovinos. Estima-se que o rebanho bovino brasileiro tenha alcançado mais de 234 milhões de animais, com produção de mais de 9 milhões de toneladas de carne bovina e quase 35 bilhões de litros de leite. A maior parte desses animais é criada a pasto.

Apesar de desafios como a degradação das pastagens e do solo e o manejo sanitário inadequado em certas regiões, a pecuária bovina brasileira avançou muito nas últimas cinco décadas em função da observação dos princípios básicos, ou os pilares da produção animal, como o melhoramento genético, manejo nutricional e sanitário do rebanho. E ainda nas questões do bem-estar animal.

A adoção de tecnologias digitais que possibilitem identificar e medir os indicadores produtivos, comportamentais e fisiológicos para melhorar a produtividade e o bem-estar dos animais pode ser decisiva para tornar a pecuária ainda eficiente. Isso já é observado no contexto da produção de suínos e aves.

Os capítulos desta seção mostram que o uso de tecnologias digitais, como a ciência de dados, big data, automação de processos, e o uso de inteligência artificial permitem a identificação animal e o monitoramento contínuo em tempo real de aspectos produtivos, reprodutivos, saúde e bem-estar dos bovinos, assim como o monitoramento das pastagens. E como o conjunto de ferramentas da chamada pecuária de precisão pode contribuir para aumentar a produtividade, eficiência e rentabilidade dos sistemas pecuários, reduzindo os impactos ambientais, e contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas de produção pecuários.

Esta seção sobre Pecuária traz inovações tecnológicas abordando temas como uso de robôs na ordenha, drones e sensores diversos para captura de imagens e sistemas de suporte à decisão. Todas essas tecnologias permitem a coleta intensiva de dados, e o desafio está na organização e no processamento dos dados, para gerar informações, e estas serem analisadas detalhadamente e fornecendo previsões e soluções para solução de problemas ou manutenção dos padrões dos sistemas.

Alberto Carlos de Campos Bernardi

Tecnologias de pecuária de precisão para o manejo de pastagens e animais[1]

69

Precision livestock technologies for pasture and animal management

Alberto Carlos de Campos Bernardi[1], Patrícia Menezes Santos[2], José Ricardo Macedo Pezzopane[3], Alexandre Rossetto Garcia[4], Waldomiro Barioni Júnior [5], Sérgio Raposo Medeiros[6], Sandra Aparecida Santos[7]

[1] *Doutor, Engenheiro Agrônomo, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alberto.bernardi@embrapa.br*
[2] *Doutor, Engenheira Agrônoma, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, patrícia.santos@embrapa.br*
[3] *Doutor, Engenheiro Agrônomo, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, jose.pezzopane@embrapa.br*
[4] *Doutor, Médico Veterinário, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil,alexandre.garcia@embrapa.br*
[5] *Doutor, Engenheiro Agrônomo, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil,waldomiro.barioni@embrapa.br*
[6] *Mestre, Estatístico, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil,sergio.medeiros@embrapa.br*
[7] *Doutor, Zootecnista, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil,sandra.santos@embrapa.br*

RESUMO

As tecnologias de automação, agricultura digital (AD) e pecuária de precisão (PP) podem contribuir para o manejo eficiente e sustentável de propriedades rurais. Os sensores, equipamentos, imagens, atuadores, sistemas para monitoramento da variabilidade edafoclimática, das pastagens e dos animais e do uso dos insumos podem ser utilizados para a coleta, armazenamento e disponibilização de dados de sistemas (intensivos ou integrados) de produção de carne e leite. A conversão e integração de dados brutos sobre clima, solo, pastagens, animais e suas interações em informações úteis cria oportunidades para o uso mais eficiente dos recursos naturais e dos fatores de produção, reduzindo o risco associado à atividade e aumentando a sustentabilidade dos sistemas de produção animal em pastagens. Devido à grande quantidade de dados e informações geradas de diferentes fontes, há a necessidade de tecnologias e métodos para padronização e processamento por meio de TIC (tecnologias de informação e comunicação). O desenvolvimento de soluções tecnológicas baseadas na aplicação de AD e PP às pastagens e animais podem contribuir para o desenvolvimento de sistemas robustos de apoio à tomada de decisão nos sistemas de produção baseado em pastagens.

Palavras-chave: índices de vegetação; identificação animal; comportamento e bem-estar animal; base de dados; sistemas de suporte à decisão.

ABSTRACT

Automation, digital agriculture (DA), and precision livestock (PL) technologies can contribute to farms' efficient and sustainable management. Sensors, equipment, images, actuators, systems for monitoring edaphoclimatic variability, pastures and animals, and inputs can be used to collect, store, and provide data from systems (intensive or integrated) of meat and milk production. The conversion and integration of climate, soil, pastures, and animals' raw data and their interactions into useful information create opportunities for more efficient use of natural resources and production factors, reducing the risk associated with the activity and increasing the sustainability of animal production in pasture systems. Due to a large amount of data and information generated from different sources, there is a need for technologies and methods for standardization and processing through ICT (information and communication technologies). The development of technological solutions based on the application of DA and PL to pastures and animals can contribute robust systems to support decision-making in production systems based on pastures.

Keywords: vegetation indices; animal identification; animal behavior and welfare; database; decision support systems.

[1] Parte do trabalho apresentado no X Simfor (Simpósio Sobre Manejo Estratégico da Pastagem), em Viçosa (MG) (outubro de 2022).

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000056

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, onde a produção de ruminantes é baseada principalmente no uso de pastagens, o monitoramento das interações clima-solo-planta-animal ganha destaque. Como representam a principal forma de uso da terra dos estabelecimentos rurais brasileiros, há forte potencial de impacto econômico, social e ambiental em aprimorar seu manejo. Nesses sistemas de produção pecuária, há duas fases distintas, mas interligadas, sendo que a primeira está relacionada à produção primária de biomassa pelas plantas forrageiras, utilizando energia solar, água e nutrientes do solo; a outra está relacionada à colheita e ingestão da forragem, e sua conversão em produto animal. Cada etapa tem sua eficiência, cuja soma determina a produção animal alcançada, e segundo Hodgson (1990) não podem ser separadas, pois há interações entre elas que influenciam muito na produção final do sistema.

Por isso, a pecuária de precisão (PP), voltada para produção de ruminantes, deve considerar as pastagens, além do componente animal. As variações espaço-temporais na disponibilidade de forragem dificultam o monitoramento e a tomada de decisão por parte dos produtores, portanto havendo grande potencial para a PP objetivamente melhorar a eficiência de uso das pastagens.

Na pecuária tradicional, há diversas ferramentas disponíveis para o monitoramento do sistema clima-solo-planta. Os produtores que monitoram o clima utilizam dados meteorológicos regionais e/ou instalam pluviômetros na propriedade. As variáveis de solo são monitoradas por meio da análise de solo, cuja amostragem é realizada com frequências e níveis de detalhe diferentes. Por fim, a produção de forragem é avaliada principalmente de forma visual. E há um grupo de produtores ainda que não monitoram o sistema, e nestes casos as decisões muitas vezes são baseadas apenas na experiência e em observações, e as decisões de manejo consideram valores médios, ou grupos ou lotes de animais. Já os produtores que adotam técnicas de AG e PP utilizam estações meteorológicas automáticas e fazem análise de solo geoespacializada. Alguns utilizam imagens de sensores distais ou proximais para monitorar biomassa de forragem, mas as ferramentas ainda são incipientes.

A pecuária de precisão (PP) permite que as decisões sejam baseadas em dados quantitativos (por exemplo biomassa por área, litros de leite por ordenha, ganho de peso diário etc.) mensurados individualmente, potencializando o desempenho do sistema (Bernardi; Perez, 2014; Berckmans, 2017).

Isso só é possível com um eficiente sistema de identificação individual e automação dos processos, que passam a ser a base do processo da PP. Na PP a produção pecuária ocorre como um conjunto de processos interligados, em uma rede complexa que incluem desde o crescimento vegetal e animal, a produção, doenças endêmicas, aspectos do comportamento animal e o ambiente físico das instalações (microclima e emissões de poluentes por exemplo) até a comercialização (Berckmans, 2017; Neethirajan; Kemp, 2021). Até o momento, a atenção se concentrou no gerenciamento de processos individuais, mas são as interações que realmente são importantes e que deverão ser doravante estudadas. Para obter esses dados, interpretar e gerar informações que darão suporte às tomadas de decisão, muitas vezes em tempo real, os sistemas PP têm utilizado a análise de dados, aprendizado de máquina (*machine learning*), sistemas de controle e as tecnologias de informação e comunicação – TIC (Banhazi et al., 2012).

1.1 Tecnologias de automação e digitalização na pecuária

A automação na produção animal inclui sistemas de controles ambiental, fisiológico e comportamental, de identificação, de monitoramento e controle da alimentação e reprodutivo (Aquilani et al., 2022; Edan et al., 2009; Paiva et al., 2016; Berckmans, 2017). Além desses, outros sistemas automatizados de pesagem, controle de saúde e bem-estar, higienização, abate e processamento estão sendo desenvolvidos. A PP está principalmente associada a sistemas indoor (Berckmans, 2017), mas também vem sendo aplicada em sistemas de pastejo intensivo e extensivo. No caso da produção a pasto, além de informações sobre os animais, o monitoramento deve incorporar sistemas e sensores de monitoramento do clima (ex.: estações meteorológicas automatizadas), do solo (ex.: ferramentas para coleta de amostras georreferenciadas) e das plantas (sensores remotos e proximais).

Mas para que os dados de monitoramento e controle, individual ou de grupo, dos vários sensores disponíveis sejam efetivos e possam orientar as decisões de manejo mais adequadas, são necessários sistemas TIC avançados (Edan et al., 2009; Paiva et al., 2016; Berckmans, 2017).

Neethirajan e Kemp (2021) revisaram criticamente o estado da arte atual da digitalização na PP, especificamente sensores biométricos, big data e tecnologia blockchain. Na pecuária digital, os dados coletados em tempo real por sensores biométricos (invasivos ou não invasivos) são processados e integrados, utilizando para isso sistemas de análise de big data que

dependem de algoritmos estatísticos para classificar grandes e complexos conjuntos de dados para fornecer aos agricultores padrões de tendências relevantes e ferramentas de tomada de decisão (Neethirajan; Kemp, 2021), como a detecção precoce de problemas individuais de saúde, especialmente de animais com alto valor econômico (Norton; Berckmans, 2017).

Os dados obtidos pelo monitoramento constante, ou consultas específicas aos big data, são usados para interpretar os eventos passados e fazer previsões futuras, e dessa forma auxiliar na tomada de decisões mais oportunas ou precisas (Wolfert et al., 2017). Os dados podem ainda ser utilizados para fins de agrupamento e classificação, por exemplo, podemos desenvolver algoritmos para classificação de nível de degradação de pastagens, contribuindo também para a gestão de riscos da atividade.

Bolfe et al. (2021) destacaram a adoção das tecnologias digitais entre os pecuaristas. Os resultados indicaram que 64% utilizam aplicativos móveis, softwares ou plataformas digitais para obter informações e apoiar a gestão da propriedade; 45% informaram o uso de ferramenta digital para gestão da propriedade; 34% utilizam sensores remotos (satélites e/ou drones) e sistemas de posicionamento global por satélite (GPS) para monitorar e planejar, mapear e fazer uso da terra na propriedade; 40% utilizam aplicativos móveis e/ou plataformas para compra de insumos ou comercialização da produção; 30% aplicam alguma tecnologia digital em bem-estar animal; 25% para previsão climática; 20% também utilizam sensores remotos.

2 TECNOLOGIAS PARA MONITORAMENTO E MANEJO DE PASTAGENS

2.1 Aplicação de insumos em taxa variável

A baixa fertilidade do solo é apontada por técnicos e produtores como um dos principais problemas das pastagens no Brasil, e a aplicação de corretivos e fertilizantes, além do ajuste da taxa de lotação, é a principal solução utilizada pelos produtores para contornar esse problema atualmente (Santos; Euclides, 2022). A aplicação de fertilizantes também permite aumentar a capacidade de suporte das pastagens, principalmente quando aliada ao uso de estratégias para suplementar a alimentação dos animais no período de menor crescimento do capim (Santos, 2021).

O conhecimento da variabilidade espacial das propriedades do solo é essencial para o uso racional de calcário e fertilizantes, como na aplicação localizada dos insumos em pastagens manejadas intensivamente. Com os resultados de análises químicas de amostras de solo georreferenciadas, análise da variabilidade espacial, elaboração de mapas das propriedades do solo e das necessidades de insumos, é implementada a tecnologia de aplicação em taxa variável (*Variable Rate Technology* – VRT) (Bernardi et al., 2015) a partir do fornecimento de corretivos e fertilizantes em quantidades distintas para diferentes partes do talhão. O uso das tecnologias de amostragem de solo georreferenciada, estabelecimento de zonas de manejo e aplicação de insumos a taxa variável (Figura 1) foram úteis para o manejo de pastagens como mostrados nos trabalhos de Bernardi et al. (2016, 2017, 2018, 2019) e Santos et al. (2017). A aplicação da VRT resultou em maior homogeneidade dos atributos químicos do solo, correção das propriedades químicas do solo e redução das necessidades de insumo.

2.2 Sensoriamento remoto e proximal em pastagens

As estimativas da biomassa de pastagens podem ser obtidas por meio do corte, secagem e pesagem de amostras colhidas no campo e processadas em laboratório. O processo é laborioso e demorado, muitas vezes não atendendo à demanda dos produtores. Devido a variabilidade espacial de produção que as pastagens tropicais apresentam, o método de quantificação por meio do corte, também chamado de método direto, pode apresentar erros nas estimativas se o número de amostras não for suficiente para indicar as diferenças em um piquete. Por isso as estimativas com o uso de sensoriamento remoto (por imagens de satélite) ou proximal (pelo uso de sensores) tem despertado cada vez maior atenção (Ali et al., 2016).

Há outras tecnologias que têm sido usadas para medição indireta da biomassa de pastagens, que incluem medições ópticas espectrais, capacitância e altura da parte aérea (López-Díaz et al., 2011).

O sensoriamento remoto e sensoriamento proximal são as duas técnicas mais comuns de aquisição de informações sobre um objeto ou qualquer fenômeno sem contato físico com o objeto por meio da interação entre a radiação eletromagnética com a superfície. O sensoriamento remoto, utilizando imagens multi ou hiperespectrais, está associado ao uso de plataformas de satélite, aerotransportadas ou UAV. Já no sensoriamento proximal, os sensores estão próximos ao objeto e podem utilizar desde imagens RGB simples, ou de nível de cinza, até sistemas de imagem de alta resolução, multiespectrais e hiperespectrais, ou ainda câmeras termográficas. Estes sistemas podem ser instalados em plataformas, que variam de instalações portáteis, fixas ou robóticas a sensores embarcados em máquinas agrícolas.

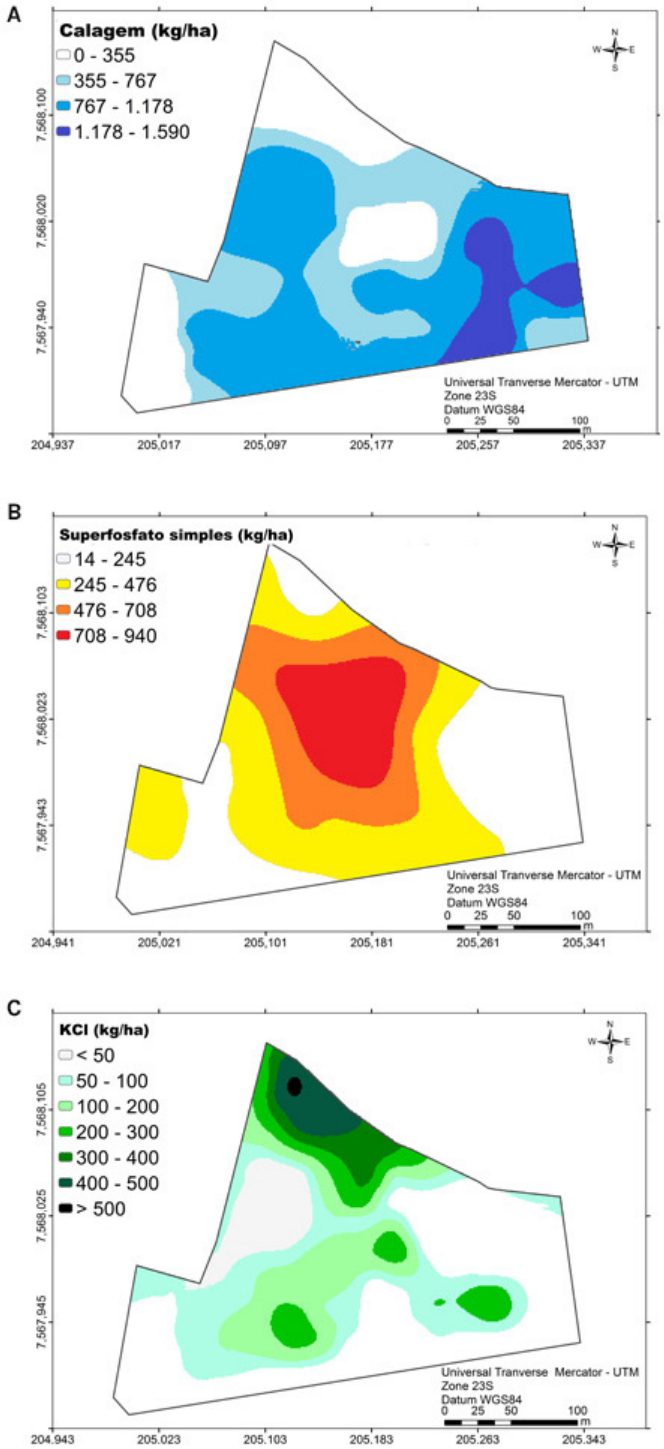


Figura 1. Mapas de aplicação de calcário (A), superfosfato simples (B) e KCl (C) a taxa variável em pastagem de alfafa (*Medicago sativa* cv. Crioula) em São Carlos/SP.
Fonte: Adaptado de Bernardi et al. (2016).

As combinações matemáticas são utilizadas para o cálculo dos índices de reflectância, com base nas medições das intensidades da luz refletida em comprimentos de onda específicos, e são a forma convencional de análise de dados espectrais (Pezzopane et al., 2019, 2022).

O índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) tem sido amplamente utilizado como indicador de produtividade, qualidade e vigor da vegetação em pastagens (Svoray et al., 2013; Ali et al., 2016; Pezzopane et al., 2019, 2022). Para pastagens tropicais altamente produtivas, o NDVI tem apresentado

saturação quando a biomassa de forragem é muito alta, enquanto o SRI, por não saturar sob essas condições, apresenta resultados melhores (Pezzopane et al., 2019). Em parcelas experimentais, sob corte mecânico, a utilização do SRI se mostrou uma boa alternativa para a estimativa de biomassa total, massa de folhas e massa de folhas + colmo de *Urochloa brizantha* "Marandu". Esse índice também se mostrou eficiente para estimar a extração de nitrogênio pelo pasto, demonstrando potencial para uso no auxílio da adubação nitrogenada (Pezzopane et al., 2022). A Figura 2 mostra as imagens com comprimento de ondas no visível e no infravermelho (A e B), obtidas com câmera RGB, e os índices de vegetação MPRI e NDVI (C e D) calculados a partir dessas imagens para uma área de pasto irrigada por pivô em São Carlos/SP.

2.3 Uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs) em pastagens

O uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs) para coletar imagens da área de interesse está rapidamente se tornando uma alternativa viável (Barbedo et al., 2020). Essas imagens têm despertado um interesse crescente para o monitoramento de sistemas agropecuários (Jorge et al., 2014) e são uma alternativa às imagens de satélite (Aasen et al., 2015). Jorge et al. (2014) detalharam os tipos de VANTs e sensores disponíveis e os avanços tecnológicos nesses equipamentos, bem como sua aplicação em missões de monitoramento e manejo, destacando os benefícios quanto como na redução de custos, tamanho dos equipamentos e necessidade de otimização da produção. Com o uso do VANT, o usuário tem autonomia para definir a frequência de obtenção das imagens, o que é importante para basear as decisões em sistemas de pastejo, como no caso da Figura 2, que ilustra um sistema de pastejo rotacionado irrigado com pivô central em São Carlos/SP. Na imagem obtida por VANT é possível levantar informações sobre a dinâmica de pastejo na área, e associado ao índice de vegetação (MPRI) para fazer estimativas da produção de biomassa, por exemplo.

As imagens de satélite de resolução média podem ser utilizadas na agricultura em programas de monitoramento agrícola por meio da cobertura sistemática, já as imagens de satélite comerciais com alta resolução espacial, cobrindo áreas acima de 2.500 hectares, podem ter alto custo de aquisição. O uso de VANT permite a obtenção de imagens de grande resolução (Aasen et al., 2015), sendo apropriadas para o manejo localizado em propriedades. Com os VANTs operando em voos a uma altura constante a dezenas de metros do solo, de maneira geral, apresentam resoluções de alguns centímetros por pixel menores que as imagens de satélites. Sampaio et al. (2020) compararam os índices de vegetação obtidos a partir de imagens de satélite (Landsat-8) e de veículo aéreo não tripulado (VANT) em uma área de pastagem irrigada em São Carlos/SP (Figura 3). As imagens ilustram a as diferenças da resolução das imagens obtidas por satélite e com o VANT.

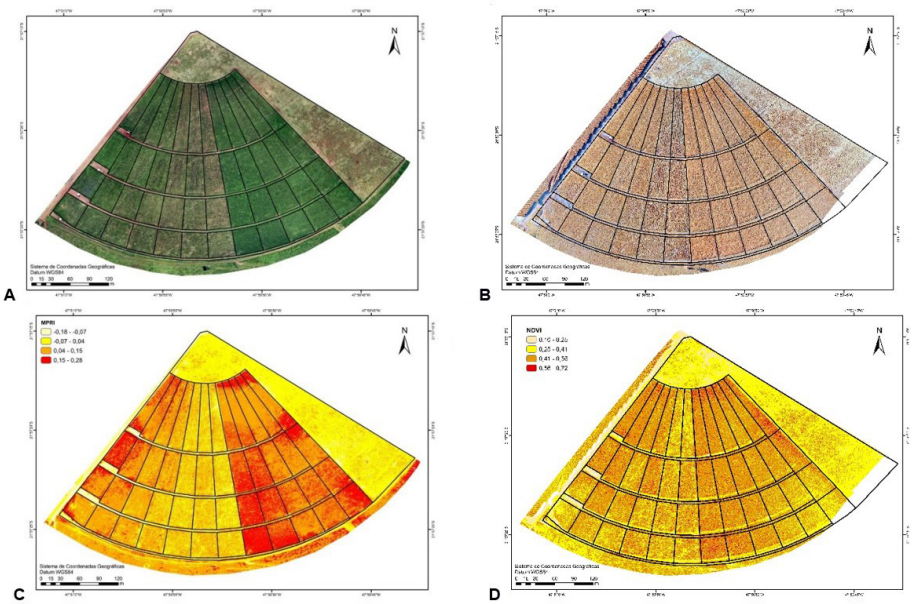


Figura 2. Imagens RGB (A), infravermelho (B) e os índices de vegetação MPRI (C) e NDVI (D) para uma área de pastagem (*Megathyrsus maximus* cv. Tanzânia) irrigada por pivô em São Carlos/SP. Obs.: as datas de coleta das imagens foram as mesmas em A e C, e B e D.

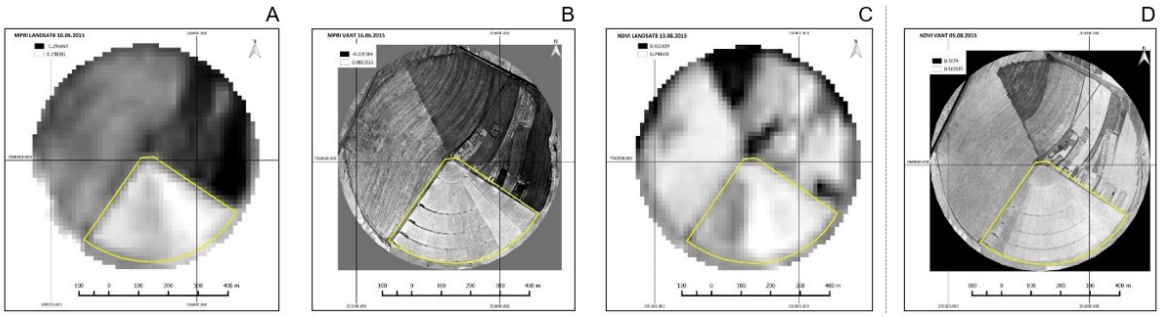


Figura 3. Índices MPRI (A e B) e NDVI (C e D) obtidos a partir das imagens de satélite Landsat-8 e VANT de pastagem (*Megathyrsus maximus* cv. Tanzânia) irrigada por pivô em São Carlos/SP.
Fonte: Adaptado de Sampaio et al. (2020).

3 TECNOLOGIAS PARA MONITORAMENTO E MANEJO DE ANIMAIS EM PASTAGENS

3.1 Identificação dos animais

A identificação dos animais de produção a pasto permite o gerenciamento individual e é um pré-requisito para a PP, que permite a associação e rastreamento de características relevantes de um indivíduo ao longo do tempo (Qiao et al., 2021). Ferramentas e métodos manuais ou automatizados podem ser utilizados para identificar bovinos. O Quadro 1 sumariza essas tecnologias. Há sistemas de identificação baseados em recursos físicos, utilizando tatuagens, brincos, tarjetas e marcas não digitais. O avanço da tecnologia proporcionou o desenvolvimento de métodos mais eficientes de identificação e rastreamento, que podem estar baseados no uso de antenas de muito alta frequência (VHF), do sistema de posicionamento global (GPS) e de identificação por radiofrequência (RFID).

Como cada identificador tem sua particularidade na forma de aplicação, devem-se considerar, no momento da aplicação, as vantagens e desvantagens em relação ao bem-estar e comportamento animal. Outros fatores importantes envolvidos na identificação, além do risco de perda, e no seu uso são os custos com o tipo de identificador adotado, com os aparatos de aplicação, recursos tecnológicos e mão de obra treinada (Barioni Júnior et al., 2016).

A identificação eletrônica dos animais facilita o manejo do rebanho, permite acompanhar seu histórico e garante a rastreabilidade das informações referentes àquele indivíduo, fornecendo informações sobre saúde ou bem-estar, por exemplo, para a tomada de decisão mais rápida e adequada sobre o manejo. Existem várias alternativas de identificadores animais que estão sendo utilizados tanto na pesquisa como comercialmente (Berckmans, 2017; Qiao et al., 2021).

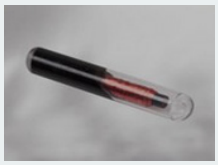
Mais recentemente surgiram trabalhos que integram múltiplas visões de faces de bovinos para identificação (Barbedo et al., 2019). Uma opção aos métodos tradicionais de identificação foi utilizada no Brasil por Weber et al. (2020a), que criaram um sistema com o uso de inteligência artificial que reconheceu individualmente bovinos por imagens com até 99,8% de acurácia.

3.2 Comportamento e bem-estar animal

A automação pecuária de ruminantes depende, dentre outros fatores, do conhecimento do comportamento animal. Esse conhecimento é fundamental para o desenvolvimento de métodos integrados com tecnologia eletrônica sem fio e sistemas de decisão para o manejo de animais em pastejo. As informações sobre a posição dos animais e a oferta diferencial de água e alimentos podem fornecer opções de intervenção na distribuição espacial dos animais (Anderson et al., 2013). O monitoramento conjunto das diferentes atividades (tempo de pastejo, ruminação, descanso) e da posição dos animais pode ser muito útil na identificação e delimitação de áreas de preferência, fornecendo informações para o manejo sanitário e sobre seu bem-estar. Com esse conhecimento é possível, por exemplo, ajustar mais adequadamente a pressão de pastejo (Laca, 2009).

Os sistemas de produção animal baseados no uso de pastagens (Bernardi; Perez, 2014) incorporam outros tipos de interação, desafiando os animais a superar restrições ambientais de difícil controle. Restrição à sombra e à água para dessedentação e variações de relevo são fatores que se somam nos efeitos da produção de forragem. Nessas circunstâncias, as heterogeneidades espaciais e temporais se ampliam, dificultando a aferição dos resultados econômicos de práticas de manejo sítio-específicas e, por conseguinte, sua adoção. Diante disso, o conhecimento, o mo-

Quadro 1. Tipos de identificação para bovino.

Identificadores de bovinos	Imagem real	Identificadores de bovinos	Imagem real
1. Marca de fogo – ferro quente*		7.Brinco tipo botão eletrônico – **RFID** (conjunto macho e fêmea)*	
2. Marca a ferro com nitrogênio líquido (a frio)*		8. Brinco eletrônico implantável - **RFID** (subcutâneo –microchip/*Glasstag*) *	
3. Tatuagem: parte interna da orelha, entre as duas nervuras superiores*		9. Bollus intra-ruminal – **RFID**	
4. Brinco visual com numeração*		10. Colar	
5. Botão (não eletrônico, numerado)*		11. Imagem digital – reconhecimento facial por câmera digital ou por celular (aplicativo)	
6. Brinco visual, com código de barras*		12. Biometria do espelho nasal (mufla) é como a impressão digital. Escaneia a mufla do bovino. Marcação única e permanente.	

*Formas válidas de identificação pelo Sisbov (Brasil, 2006);
Fotos: Autores (Barioni Jr; Garcia).

nitoramento e o gerenciamento dessas relações constituem um campo importante para a aplicação das ferramentas de PP em sistemas de produção de ruminantes em pastagens, sobretudo quando se consideram a amplitude de ambientes e os sistemas de produção à base de pasto presentes no Brasil.

Um dos princípios para monitoramento de animais criados em pastagens é sua identificação individualizada e precisa. Em sistemas analógicos de observação e monitoramento, os animais podem ser identificados com recursos físicos. Nesses casos, o rastreamento dos animais é realizado por observação ao vivo ou por imagens pré-gravadas. Para isso é necessário utilizar indivíduos treinados para monitorar e registrar os animais e suas atitudes. Essas equipes devem ser bem treinadas, observadores/registradores disponíveis no momento das campanhas de observação, necessidade de estabelecimento de bases físicas para as equipes, além das restrições e dificuldades de observação inerentes aos turnos da noite e da madrugada. Ainda, o desempenho desses métodos também é limitado devido à sua vulnerabilidade, perdas, duplicações, custos de mão de obra e erros de registro humano.

Por sua vez, o monitoramento baseado em dispositivos digitais permite contornar diversas dificuldades intrínsecas aos modelos analógicos. O motivador do monitoramento remoto de animais em pastagens é a necessidade dos produtores de realizar inventário de

rebanho e manejar mais fácil e precocemente aqueles animais que requerem cuidados especiais (por ex., vacas no pré-parto e animais jovens), bem como para o diagnóstico precoce e tratamento de enfermidades.

Para que o monitoramento baseado em tecnologias de PP ocorra, Garcia et al. (2020) reportam que a identificação eletrônica dos indivíduos é a primeira camada tecnológica de adoção, a qual permite acesso às demais funcionalidades e aos sistemas digitais. Para isso, os animais podem ser identificados com brincos ou *bottoms* eletrônicos, bem como *transponders* implantáveis ou dispositivos vestíveis, que operam com o sistema de RFID. Essas tecnologias têm sido aplicadas com sucesso em espécies como bovinos e bubalinos (Garcia et al., 2020; Cappai et al., 2019). Outro quesito relevante para a adoção de estratégias de monitoramento animal a campo reside na conectividade, muitas vezes deficitária na zona rural do Brasil. Para superar essa dificuldade, a construção de redes locais que permitam a cobertura da área de interesse da propriedade e, em certo ponto, sua conexão à internet para transmissão de dados pode favorecer a adoção de tecnologias digitais (Garcia et al., 2019) enquanto a cobertura de última geração não alcança a totalidade da zona rural.

Do ponto de vista prático, pesquisas pioneiras têm sido realizadas com bovinos a pasto, identificando padrões comportamentais dos animais que envolvem atitudes como o seu deslocamento nas áreas de pastagem, bem como o tempo dedicado ao ócio e à ruminação. A Figura 4 mostra animais monitorados em sistema ILPF da Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos/SP, com colar e sistema de conectividade alimentado por energia fotovoltaica. O comportamento de fêmeas em sistema de produção em pastejo rotacionado com elementos mínimos de sombreamento natural foi descrito e constituiu o primeiro passo para maior entendimento dos resultados obtidos eletronicamente de bovinos criados em clima tropical (Garcia et al., 2018). O deslocamento dos animais foi mais intenso durante a tarde (31,9 ± 0,8 min/h), enquanto maior tempo de ruminação foi observado à noite (19,1 ± 0,6 min/h) e de madrugada (17,6±0,5 min/h). Apesar de a tarde ser o período mais desafiador quanto ao conforto térmico, os animais apresentaram menor tempo em ócio neste turno quando comparado às manhãs (17,5 ± 0,6 vs. 28,5 ± 0,6 min/h; $P < 0,05$) (Garcia et al., 2018). Com o plantio do componente arbóreo nos sistemas de produção, espera-se aumento do conforto térmico e reflexos no comportamento dos animais. E os resultados mostraram que as novilhas Canchim criadas em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) apresentam maior tempo de descanso durante as noites e as madrugadas, comparativamente àquelas criadas sem acesso a sombreamento natural. Por sua vez, novilhas criadas em pastagem a pleno sol apresentam maior tempo de ruminação, em qualquer um dos turnos analisados, indicando mais tempo em uma atividade altamente geradora de calor endógeno (Barreto et al., 2019), o que impacta negativamente no conforto térmico de animais criados nos trópicos. Termografia infravermelho tem sido utilizada para avaliar o conforto térmico de bovinos em sistemas agroflorestais (Barreto et al., 2020).

3.3 Cercas virtuais

Uma das tecnologias promissoras para o manejo otimizado do pastejo é o uso de cerca virtual, onde o produtor define a área de pastejo monitorando o uso espacial dos animais em tempo real por meio de colares automatizados e ajustados para cada animal (Umstatter, 2011; Aquilani et al., 2022). O uso dessa tecnologia requer que os animais sejam previamente adaptados no local, levando em consideração a ava-

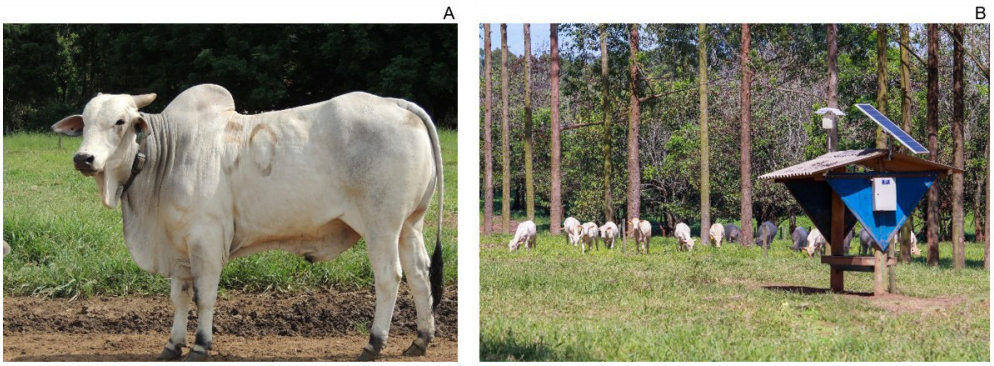


Figura 4. Animal monitorado com colar (A) e o sistema de conectividade alimentado por energia fotovoltaica (B).
Fotos: Maio e Sussai.

liação de medidas que assegurem o bem-estar deles (Lee; Campbell, 2021). Pois o funcionamento da cerca virtual requer que os animais portem sensores de localização (GPS), associado a dispositivos com sinal sonoro e com estímulo elétrico. Desse modo, ao animal se aproximar do limite predeterminado, o colar emite um sinal sonoro e, caso o animal continue a caminhar além do limite, há liberação de um estímulo elétrico de cerca de 800 V, por períodos de um segundo.

3.4 Pesagem de bovinos a pasto

As informações sobre o peso corporal de bovinos são importantes para orientar as decisões de manejo relacionadas a nutrição, genética, saúde e desempenho. Essa variável está diretamente associada à dieta, reprodução, saúde e bem-estar. Especificamente quanto ao manejo de pastagens, a pressão de pastejo exercida é estabelecida em função do consumo do animal que, por sua vez, é diretamente proporcional ao peso do animal. No caso de gado de corte, o peso corporal é definidor do desempenho e informação fundamental para a decisão de abate dos animais. Para obter a máxima acurácia do peso do rebanho, as medidas devem ser realizadas periódica e repetidamente.

As medidas de peso podem ser realizadas de forma direta ou indireta. No caso de pesagem direta, a pesagem dos animais nos centros de manejo, por método convencional com balança, é demorada e trabalhosa e pode ser estressante para os animais. Já as balanças de passagem podem ser uma alternativa prática, pois a pesagem dos animais ocorre em plataformas automáticas (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2017).

Essas balanças, de passagem ou estáticas, instaladas estrategicamente no campo permitem as pesagens de modo direto, automático, rápido, sem demandar intervenção humana direta, com um procedimento menos estressante para todo rebanho que a pesagem nos centros de manejo (Brown et al., 2014). Cveticanin e Wendl (2004) desenvolveram um sistema de pesagem dinâmica com uso de lógica fuzzy para vacas leiteiras cujo modelo matemático simulava o caminhar da vaca. É interessante que o sistema simplifica o movimento da vaca para duas patas, usando as medidas de velocidade do caminhar e peso dos animais para criar uma curva que é comparada com um banco de dados. O erro médio absoluto inferior a 2% na pesagem corporal. Os animais também podem ser pesados estaticamente no campo, por meio de balança acoplada a bebedouro (Novelli et al., 2022).

As pesagens por métodos indiretos ou métodos alternativos, com abordagens automatizadas utilizando técnicas de visão computacional e os algoritmos de processamento digital de imagens, podem ser obtidas com sensores 2D ou 3D (por exemplo RGB, térmica, LiDAR etc.). As estimativas têm como base as medidas área corporal (vista superior), altura da cernelha e do quadril, comprimento do corpo, largura do quadril, volume corporal e perímetro torácico e são amplamente utilizadas nas abordagens (Dohmen et al., 2022; Qiao et al., 2021). As estimativas podem ser melhoradas pelo uso de algoritmos de aprendizado de máquina (Dohmen et al., 2022), porém algoritmos adequados para extração de informações relevantes das imagens ainda são raros (Barbedo et al., 2020). Weber et al. (2020b) no Brasil mostraram que pode ser estimado o peso corporal de bovinos Girolando e Nelore, com coeficientes de correlação de 0,71 a 0,75, por medidas corporais extraídas de imagens desses bovinos.

3.5 Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) no monitoramento animal

O manejo da pecuária em sistemas de produção extensivo pode ser desafiador, principalmente em grandes áreas de pastagens, e o monitoramento dos rebanhos é essencial na gestão das propriedades. Nas grandes propriedades que adotam a pecuária extensiva, muito comum no Brasil, o inventário do rebanho por meio de levantamentos aéreos pode ser uma solução potencial, como foi demonstrado por Barbedo e Koenigkan (2018) e Barbedo et al. (2019, 2020). Essas pesquisas para detecção e contagem de rebanhos usando VANTs têm utilizado técnicas de processamento de imagens e aprendizado de máquina, aliadas ao desenvolvimento de softwares para a criação de algoritmos de processamento para reconhecer e contar automaticamente os animais nas imagens capturadas.

4 DADOS E SISTEMAS DE SUPORTE À DECISÃO

O desafio para o sucesso da agricultura de precisão para o manejo de pastagens está no desenvolvimento de sistemas robustos de suporte à decisão que possam converter em informação útil à gestão a grande diversidade de dados coletados pelas diferentes tecnologias presentes em sensores e equipamentos (Schellberg et al., 2008).

A integração de tecnologias de precisão, big data, modelagem e análise de dados orientada para a solução dos problemas tornará possível o manejo das pastagens e animais com mais eficiência e sustentabilidade, tornando os sistemas de pastagens mais competitivos, independentemente do tipo de sistema de produção. As tecnologias de precisão em pastagens vi-

sam sincronizar a demanda de alimentos dos animais com o pasto disponível. Para obter o manejo sustentável e eficiente das pastagens, sistemas de tomadas de decisão devem considerar, além da produtividade, qualidade, utilização e lucratividade das pastagens (Shalloo et al., 2018), a conservação dos serviços ecossistêmicos que contribuem com a produção de serviços de provisão com valor de uso direto e outros serviços com valor de uso indireto, em especial o estoque de carbono (Whitehead, 2020; Santos et al., 2020). O manejo eficiente das pastagens também depende das estratégias de suplementação alimentar, que por sua vez depende do conhecimento preciso do valor nutritivo da forragem consumida pelos animais (Tedeschi et al., 2019). O ideal seria integrar as informações das pastagens no contexto da gestão da propriedade, de forma holística (sistema de produção). Tagarakis et al. (2021) desenvolveram um sistema de fazenda inteligente adotando práticas da agricultura circular (Biocircular) em sistemas de produção de leite para redução de impacto nas mudanças climáticas.

Os sistemas de pastagens são ecossistemas dinâmicos e complexos, influenciados principalmente pelas interações entre plantas, animais, solos, clima e manejo. Nas últimas décadas têm expandido no Brasil os sistemas integrados e multifuncionais como alternativa para recuperação de pastagens e como opção sustentável de manejo, pois otimiza o uso da terra e contribui para o aumento dos serviços ambientais e ecossistêmicos (Balbino et al., 2011). Para melhor entender as interações entre os componentes desses diferentes tipos de sistemas de produção de pastagens, o desenvolvimento de sistemas inteligentes de apoio à decisão tem um grande papel na busca de sistemas mais eficientes e na sustentabilidade da pecuária (Jones et al., 2017; Tedeschi et al., 2021).

Há vários tipos de sistemas de apoio à decisão (SAD) descritos na literatura: SAD orientado à comunicação; SAD orientado a dados, SAD orientado a documentos, SAD orientado a conhecimento; SAD orientado a modelos; SAD orientado à WEB. Existem várias ferramentas disponíveis e a escolha depende do problema a ser solucionado e saber como interpretar esses dados de forma inteligente na tomada de decisão. Sistemas inteligentes não usam somente informações e sim procuram extrair conhecimentos. A tomada de decisão depende das informações disponíveis, e no SAD orientado à WEB, por exemplo, pode auxiliar os usuários a partir dos serviços disponíveis na internet (Dastres; Soori, 2022). Um exemplo de SAD orientado à Web nas pastagens é a ferramenta FORAGE, que foi desenvolvida para facilitar a utilização de boas práticas de manejo das pastagens (Zhang; Carter, 2018) e o sistema de decisão de pastagens da Irlanda (Hanrahan et al., 2015). Para o desenvolvimento dos SADs, diversas ferramentas são utilizadas como apoio que inclui as ferramentas da inteligência artificial, tendo como exemplo o aprendizado de máquina que pode ser utilizado para a criação de modelos preditivos como a predição da biomassa acima do solo (Morais et al., 2021), entre outros. De maneira geral, os sistemas de informação necessitam da integração de várias tecnologias associadas com a participação dos atores-chave, pois, de maneira geral, os SADs ainda são pouco implementados nas propriedades (Lindblom et al., 2017), embora a tendência da adoção seja crescente (Tedeschi et al., 2021).

5 CONCLUSÕES

A integração de informações sobre clima, solo, pastagens e animais obtidas por tecnologias de precisão cria oportunidades para o uso mais eficiente dos recursos naturais e dos fatores de produção, reduzindo o risco associado à atividade e aumentando a sustentabilidade dos sistemas de produção animal em pastagens.

O desenvolvimento de soluções tecnológicas baseadas na aplicação de sistemas inteligentes e automatizados às pastagens pode contribuir para o processo de tomada de decisão nos sistemas de produção. Para isso, é de extrema importância análise e interpretação de dados e informações para o desenvolvimento de sistemas robustos de apoio à tomada de decisão, de preferência no contexto holístico de gestão da propriedade, para aumentar a aplicabilidade da AD e PP nos sistemas de produção pecuários.

O investimento em tecnologias de precisão deve ser justificado pelos benefícios gerados, a partir do desenvolvimento de formas de avaliar o custo-benefício, de modo que os produtores façam o planejamento de adoção de acordo com suas reais necessidades.

REFERÊNCIAS

AASEN, H.; BURKART, A.; BOLTEN, A.; BARETH, G. Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: from camera calibration to quality assurance. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. *108*, p. 245-259, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.08.002.

ALI, I.; CAWKWELL, F.; DWYER, E.; BARRETT, B.; GREEN, S. Satellite remote sensing of grasslands: from observation to management-a review. **Journal of Plant Ecology**,

v. *9*, n. 6, p. 649-667, 2016. DOI: http://doi.org/10.1093/jpe/rtw005.

ANDERSON, D. M.; ESTELL, R. E.; CIBILS, A. F. Spatiotemporal cattle data: a plea for protocol standardization. **Positioning**, v. *4*, n. 1, p. 115-136, 2013. DOI: http://doi.org/10.4236/pos.2013.41012.

AQUILANI, C.; CONFESSORE, A.; BOZZI, R.; SIRTORI, F.; PUGLIESE, C. Review: precision Livestock Farming technologies in pasture-based livestock systems. **Animal**, v. *16*, n. 1, p. 100429, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100429.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; PORFIRIODA-SILVA, V.; MORAES, A.; MARTÍNEZ, G. B.; ALVARENGA, R. C.; KICHEL, A. N.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. *46*, n. 10, p. 1-12, 2011. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000001.

BANHAZI, T. M.; LEHR, H.; BLACK, J. L.; CRABTREE, H.; SCHOFIELD, P.; TSCHARKE, M.; BERCKMANS, D. Precision Livestock Farming: an international review of scientific and commercial aspects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. *5*, n. 3, p. 1-9, 2012.

BARBEDO, J. G. A.; KOENIGKAN, L. V. Perspectives on the use of unmanned aerial systems to monitor cattle. **Outlook on Agriculture**, v. *47*, n. 3, p. 214-222, 2018. DOI: http://doi.org/10.1177/0030727018781876.

BARBEDO, J. G. A.; KOENIGKAN, L. V.; SANTOS, P. M.; RIBEIRO, A. R. B. Counting cattle in UAV images-dealing with clustered animals and animal/background contrast changes. **Sensors (Basel)**, v. *20*, n. 7, p. 2126, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/s20072126.

BARBEDO, J. G. A.; KOENIGKAN, L. V.; SANTOS, T. T.; SANTOS, P. M. A study on the detection of cattle in UAV images using deep learning. **Sensors (Basel)**, v. *19*, n. 24, p. 5436, 2019. DOI: http://doi.org/10.3390/s19245436.

BARIONI JÚNIOR, W.; MACHADO, C. G. C. F.; GARCIA, A. R.; ESTEVES, S. N.; PARANHOS, N. E. Avaliação da performance de identificador eletrônico por radiofrequência para bovinos de corte, produzido no Brasil. In: CONGRESSO DE ZOOTECNIA DE PRECISÃO, 1., 2016, Florianópolis, SC. **Anais** [...]. São Paulo: Instituto Oswaldo Gessulli, 2016. v. 1. p. 1-5.

BARRETO, A. N.; GARCIA, A. R.; BERNARDI, A. D. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; ROMANELLO, N.; SOUSA, M. A. P. Monitoramento eletrônico do comportamento de novilhas de corte mantidas em sistema de iLPF. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ZOOTECNIA, 29., 2019, Uberaba, MG. **Anais [...]**. Brasília: Associação Brasileira de Zootecnistas, 2019. v. 1. p. 110351.

BARRETO, C. D.; ALVES, F. V.; OLIVEIRA RAMOS, C. E. C.; PAULA LEITE, M. C.; LEITE, L. C.; JUNIOR, N. K. Infrared thermography for evaluation of the environmental thermal comfort for livestock. **International Journal of Biometeorology**, v. *64*, n. 5, p. 881-888, 2020. DOI: http://doi.org/10.1007/s00484-020-01878-0.

BERCKMANS, D. General introduction to precision livestock farming. **Animal Frontiers**, v. *7*, n. 1, p. 6-11, 2017. DOI: http://doi.org/10.2527/af.2017.0102.

BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; FERREIRA, R. P.; SANTOS, K. E. L.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Spatial variability of soil properties and yield of a grazed alfalfa pasture in Brazil. **Precision Agriculture**, v. *17*, n. 6, p. 737-752, 2016. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-016-9446-9.

BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; GREGO, C. R.; ANDRADE, R. G.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. *32*, n. 1/2, p. 205-221, 2015.

BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; MAZZUCO, G. G.; ESTEVES, S. N.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M. Spatial variability of soil fertility in an integrated crop livestock forest system. **Advances in Animal Biosciences**, v. *8*, n. 2, p. 590-593, 2017. DOI: http://doi.org/10.1017/S2040470017001145.

BERNARDI, A. C. C.; LAURENTI, N.; BETTIOL, G. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; ALVES, T. C.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N.; PEZZOPANE, R. M. Otimização do uso de insumos em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com ferramentas de agricultura de precisão. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. *13*, n. 4, p. 290-300, 2019. DOI: http://doi.org/10.18011/bioeng2019v13n4p290-300.

BERNARDI, A. C. C.; PEREZ, N. B. Agricultura de precisão em pastagens. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (eds.). **Agricultura de precisão***: resultados de um novo olhar*. Brasília: Embrapa, 2014. p. 492-499.

BERNARDI, A. C. de C.; BERNDT, A.; GARCIA, A. R.; NOVO, A. L. M.; GUIMARÃES, E. da S.; PORTUGAL, J. A. B.; PEZZOPANE, J. R. M.; PALHARES, J. C. P.; BARIONI JÚNIOR, W. **Aplicação da agricultura e pecuária de precisão na Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos – SP**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2018. 4 p. Nota Técnica/Nota Científica.

BOLFE, E. L.; VICTORIA, D.; LUCHIARI JUNIOR, A.; COSTA, C. C.; JORGE, L. **Tecnologias digitais na pecuária**: aplicações, desafios e expectativas. Análise da equipe de especialistas. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2021. Boletim CiCarne, ano 1, n. 37, p. 1-3.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Cartilha do novo serviço de rastreabilidade da cadeia produtiva de bovinos e bubalinos - SISBOV**. Brasília: SDC/ABIEC/CNA/ACERTA, 2006. 20 p.

BROWN, D. J.; SAVAGE, D. B.; HINCH, G. N. Repeatability and frequency of in-paddock sheep walk-over weights: implications for individual animal management. **Animal Production Science**, v. *54*, n. 2, p. 207-213, 2014. DOI: http://doi.org/10.1071/AN12311.

CAPPAI, M. G.; GAMBELLA, F.; PICCIRILLI, D.; RUBIU, N. G.; DIMAURO, C.; PAZZONA, A. L.; PINNA, W. Integrating

the RFID identification system for Charolaise breeding bulls with 3D imaging for virtual archive creation. **PeerJ. Computer Science**, v. *5*, n. e179, p. e179, 2019. DOI: http://doi.org/10.7717/peerj-cs.179.

CVETICANIN, D.; WENDL, G. Dynamic weighing of dairy cows: using a lumped parameter model of cow walk. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *44*, n. 1, p. 63-69, 2004. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2004.03.001.

DASTRES, R.; SOORI, M. Advances in web-based decision support systems. International. **Journal of Engineering and Future Technology**, v. *19*, n. 1, 2022.

DOHMEN, R.; CATAL, C.; LIU, Q. Computer vision-based weight estimation of livestock: a systematic literature review. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. *65*, n. 2-3, p. 227-247, 2022. DOI: http://doi.org/10.1080/00288233.2021.1876107.

EDAN, Y.; HAN, S.; KONDO, N. Automation in agriculture. In: NOF, S. Y. (ed.). **Handbook of automation**. Berlin: Springer-Verlag, 2009. p. 1095-1128. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-540-78831-7_63.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Balança de passagem**: BalPass. Brasília, 2017. 1 p. Disponível em: https://www.embrapa.br/pt/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/4214/balanca-de-passagem---balpass. Acesso em: 13 jun. 2024.

GARCIA, A. R.; BARROS, D. V.; OLIVEIRA JUNIOR, M. C. M.; BARIONI JUNIOR, W.; SILVA, J. A. R.; LOURENÇO JUNIOR, J. B.; SANTOS PESSOA, J. Innovative use and efficiency test of subcutaneous transponders for electronic identification of water buffaloes. **Tropical Animal Health and Production**, v. *52*, n. 6, p. 3725-3733, 2020. DOI: http://doi.org/10.1007/s11250-020-02410-7.

GARCIA, A.R.; BERNARDI, A. D. C.; Pezzopane, J. R. M.; GUIMARAES, E. D. S.; PEDROSO, A. D. F.; Romanello, N.; Barreto, A. N. Configuração de rede informatizada para monitoramento do bem-estar e comportamento de bovinos de corte a pasto. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 2019, São Carlos, SP. **Anais [...]**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2019. v. 1. p. 231-235.

GARCIA, A.R.; GIRO, A.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; PEDROSO, A. F.; GUIMARÃES, E. S.; MENDES, E. D. M.; LEMES, A. P.; ROMANELLO, N.; BOTTA, D. **Comportamento de fêmeas bovinas de corte em pastagens sem arborização, avaliado por sistema wireless de monitoramento**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2018. Circular Técnica.

HANRAHAN, L.; GEOGHEGAN, A.; O'DONOVAN, M.; GRIFFITH, V.; RUELLE, E.; WALLACE, M.; SHALLOO, L. Pasture Base Ireland: a grassland decision support system and national database. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *136*, p. 193-201, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.029.

HODGSON, J. **Grazing management***: science into practice.* New York: John Wiley & Sons, 1990. 203 p.

JONES, J. W.; ANTLE, J. M.; BASSO, B.; BOOTE, K. J.; CONANT, R. T.; FOSTER, I.; GODFRAY, H. C. J.; HERRERO, M.; HOWITT, R. E.; JANSSEN, S.; KEATING, B. A.; MUNOZ-CARPENA, R.; PORTER, C. H.; ROSENZWEIG, C.; WHEELER, T. R. Brief history of agriculture systems modeling. **Agricultural Systems**, v. *155*, p. 240-254, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.014.

JORGE, L. A.; BRANDÃO, Z. N.; INAMASU, R. Y. Insights and recommendations of use of UAV platforms in precision agriculture in Brazil. In: REMOTE SENSING FOR AGRICULTURE, ECOSYSTEMS, AND HYDROLOGY, 16., 2014, Amsterdam, Netherlands. **Proceedings** [...]. Porto: Universidade do Porto, 2014. v. 9239, p. 313-330.

LACA, E. A. Precision livestock production: tools and concepts. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. *38*, n. spe, p. 123-132, 2009. DOI: http://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300014.

LEE, C.; CAMPBELL, D. L. M. A multi-disciplinary approach to assess the welfare impacts of a new virtual fencing technology. **Frontiers in Veterinary Science**, v. *8*, p. 637709, 2021. DOI: http://doi.org/10.3389/fvets.2021.637709.

LINDBLOM, J.; LUNDSTRÖM, C.; LJUNG, M.; JONSSON, A. Promoting sustainable intensification in precision agriculture: review of decision support systems development and strategies. **Precision Agriculture**, v. *18*, n. 3, p. 309-331, 2017. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-016-9491-4.

LÓPEZ-DÍAZ, J.; ROCA-FERNÁNDEZ, A.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, A. Measuring herbage mass by non-destructive methods: a review. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. *1*, p. 303-314, 2011.

MORAIS, T. G.; TEIXEIRA, R. F. M.; FIGUEIREDO, M.; DOMINGOS, T. The use of machine learning methods to estimate aboveground biomass of grasslands: a review. **Ecological Indicators**, v. *130*, p. 68-81, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108081.

NEETHIRAJAN, S.; KEMP, B. Digital livestock farming. **Sensing and Bio-Sensing Research**, v. *32*, p. 100408, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.sbsr.2021.100408.

NORTON, T.; BERCKMANS, D. Developing precision livestock farming tools for precision dairy farming. *Animal Frontiers*, vol. *7*, no. 1, pp. 18-23, 2017. DOI: http://doi.org/10.2527/af.2017.0104.

NOVELLI, T. I.; BIUM, B. F.; BIFFI, C. H. C.; PICHARILLO, M. E.; SOUZA, N. S.; MEDEIROS, S. R.; PALHARES, J. C. P.; MARTELLO, L. S. Consumption, productivity and cost: three dimensions of water and their relationship with the supply of artificial shading for beef cattle in feedlots. **Journal of Cleaner Production**, v. *376*, p. 134088, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134088.

PAIVA, C. A. V.; JUNTOLLI, F. V.; CARVALHO, L. F. R.; BERNARDI, A. D. C.; TOMICH, T. R.; PEREIRA, L. G. R. Pecuária leiteira de precisão. In: VILELA, D. (ed.). **Pecuária de leite no Brasil***: cenários e avanços tecnológicos.* Brasília: Embrapa, 2016. p. 307-323.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; CRIPPA, P. H.; SANTOS, P. M.; NARDACHIONE, E. C. Assessment

of Piatã palisadegrass forage mass in integrated livestock production systems using a proximal canopy reflectance sensor. **European Journal of Agronomy**, v. *103*, p. 130-139, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2018.12.005.

PEZZOPANE, J. R. M.; CAMPOS BERNARDI, A. C.; BOSI, C.; SENGLING, O.; BONANI, W. L.; BRUNETTI, H. B.; SANTOS, P. M. Estimating productivity and nutritive value of Marandu palisadegrass using a proximal canopy reflectance sensor. **Experimental Agriculture**, v. *58*, n. e28, p. e28, 2022. DOI: http://doi.org/10.1017/S0014479722000242.

QIAO, Y.; KONG, H.; CLARK, C.; LOMAX, S.; SU, D.; EIFFERT, S.; SUKKARIEH, S. Intelligent perception for cattle monitoring: a review for cattle identification, body condition score evaluation, and weight estimation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *185*, p. 106143, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106143.

SAMPAIO, H. S.; BOURSCHEIDT, V.; SARRACINI, L. H.; JORGE, L. A. C.; BETTIOL, G. M.; BERNARDI, A. C. C. Comparação entre índices de vegetação obtidos por imagens aéreas com veículo aéreo não tripulado (VANT) e satélite. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. *14*, n. 2, p. 111-124, 2020. DOI: http://doi.org/10.18011/bioeng2020v14n2p111-124.

SANTOS, K. E. L.; BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; CRESTANA, S. Geoestatística e geoprocessamento na tomada de decisão do uso de insumos em uma pastagem. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. *11*, n. 3, p. 294-307, 2017. DOI: http://doi.org/10.18011/bioeng2017v11n3p294-307.

SANTOS, M. L. **Yield-gap in pasture-based animal production systems in Central-west and Southeast of Brazil (Central Brazil)**. 2021. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

SANTOS, P. M.; EUCLIDES, V.P.B. **Demandas para pesquisa e desenvolvimento para pastagens no Brasil**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2022. Série Documento.

SANTOS, S. A.; TAKAHASHI, F.; CARDOSO, E. L.; FLORES, C.; OLIVEIRA, L. O. F.; SOUZA, G. S.; GOMES, E. G.; ORTEGA, E. An emergy-based approach to assess and valuate ecosystem services of tropical wetland pastures in Brazil. **Open Journal of Ecology**, v. *10*, n. 5, p. 303-319, 2020. DOI: http://doi.org/10.4236/oje.2020.105019.

SCHELLBERG, J.; HILL, M. J.; GERHARDS, R.; ROTHMUND, M.; BRAUN, M. Precision agriculture on grassland: applications, perspectives, and constraints. **European Journal of Agronomy**, v. *29*, n. 2-3, p. 59-71, 2008. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2008.05.005.

SHALLOO, M.; O' DONOVAN, M.; LESO, L.; WERNER, J.; RUELLE, E.; GEOGHEGAN, A.; DELABY, L.; O'LEARY, N. Grass-based dairy systems, data and precision technologies. **Animal**, v. *12*, p. s262-s271, 2018. DOI: http://doi.org/10.1017/S175173111800246X.

SVORAY, T.; PEREVOLOTSKY, A.; ATKINSON, P. M. Ecological sustainability in rangelands: the contribution of remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. *34*, n. 17, p. 6216-6242, 2013. DOI: http://doi.org/10.1080/01431161.2013.793867.

TAGARAKIS, A. C.; DORDAS, C.; LAMPRIDI, M.; KATERIS, D.; BOCHTIS, D. A smart farming system for circular agriculture. *Engineering Proceedings*, vol. *9*, no. 1, pp. 10, 2021.

TEDESCHI, L. O.; GREENWOOD, P. L.; HALACHMI, I. Advancements in sensor technology and decision support intelligent tools to assist smart livestock farming. *Journal of Animal Science*, vol. *99*, no. 2, pp. skab038, 2021. DOI: http://doi.org/10.1093/jas/skab038.

TEDESCHI, L. O.; MOLLE, G.; MENENDEZ, H. M.; CANNAS, A.; FONSECA, M. A. The assessment of supplementation requirements of grazing ruminants using nutrition models. **Translational Animal Science**, v. *3*, n. 2, p. 812-828, 2019. DOI: http://doi.org/10.1093/tas/txy140.

UMSTATTER, C. The evolution of virtual fences: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *75*, n. 1, p. 10-22, 2011. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2010.10.005.

WEBER, F. L.; WEBER, V. A. M.; MENEZES, G. V.; OLIVEIRA JUNIOR, A. S.; ALVES, D. A.; OLIVEIRA, M. V. M.; MATSUBARA, E. T.; PISTORI, H.; ABREU, U.G.P. Recognition of Pantaneira cattle breed using computer vision and convolutional neural networks. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *175*, p. 105548, 2020a. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105548.

WEBER, V. A. M.; WEBER, F. L.; OLIVEIRA, A. S.; ASTOLFI, G.; MENEZES, G. V.; ANDRADE PORTO, J. V.; REZENDE, F. P. C.; MORAES, P. H.; MATSUBARA, E. T.; MATEUS, R. G.; ARAÚJO, T. L. A. C.; SILVA, L. O. C.; QUEIROZ, E. Q. A.; ABREU, U. G. P.; COSTA GOMES, R.; PISTORI, H. Cattle weight estimation using active contour models and regression trees Bagging. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *179*, p. 105804, 2020b. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105804.

WHITEHEAD, D. Management of grazed landscapes to increase soil carbon stocks in temperate, dryland grasslands. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. *28*, p. 4, 2020. DOI: http://doi.org/10.3389/fsufs.2020.585913.

WOLFERT, S.; GE, L.; VERDOUW, C.; BOGAARDT, M. Big data in smart farming: a review. **Agricultural Systems**, v. *153*, p. 69-80, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023.

ZHANG, B.; CARTER, J. FORAGE: an online system for generating and delivering property-scale decision support information for grazing land and environmental management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *150*, p. 302-311, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.010.

70

Drones e Inteligência Artificial para o monitoramento de gado

Drones and Artificial Intelligence for cattle monitoring

Jayme Garcia Arnal Barbedo[1]

[1] *Pesquisador, Embrapa Agricultura Digital, Campin=as (SP), Brasil, jayme.barbedo@embrapa.br.*

RESUMO

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), também conhecidos como Sistemas Aéreos Não Tripulados (SANTs) ou simplesmente drones, vêm sendo usados há décadas. Porém, só recentemente os padrões de segurança e operação alcançaram um nível que permita seu uso em uma classe mais ampla de aplicações. Ao mesmo tempo, tecnologias de imageamento digital vêm evoluindo continuamente, de modo que agora é possível capturar imagens de alta qualidade com uma boa relação custo-benefício. A área de inteligência artificial também experimentou uma revolução com o desenvolvimento de uma classe de modelos, chamada de aprendizado profundo, capaz de extrair a informação contida nas imagens a fim de resolver uma variedade de problemas de classificação. Como resultado, o interesse pelo uso de drones para monitoramento, rastreamento e detecção de diferentes tipos de objetos cresceu rapidamente ao longo da última década. Essa tendência se manifestou de maneira particularmente intensa na agricultura, sendo que o monitoramento animal se encontra entre as aplicações que mais podem se beneficiar desse tipo de tecnologia.

A operação de VANTs vem se tornando cada vez mais simples, especialmente no caso de aeronaves de asa rotativa ("cópteros"), e a maioria dos drones consegue realizar as missões de maneira autônoma. Porém, há muitos aspectos que, se ignorados, podem levar a resultados subótimos, tanto em termos de operação quanto de coleta e processamento de dados. Este capítulo tem como objetivo fornecer informações básicas sobre a operação dos drones, bem como descrever o processo de treinamento e uso de modelos de inteligência artificial aplicados a problemas de monitoramento de animais.

Palavras-chave: drone; VANT; imagens digitais; inteligência artificial; aprendizado profundo.

ABSTRACT

Unmanned Aerial Vehicles (UAV), also known as Unmanned Aerial Systems (UAS) or simply drones, have been used for decades. However, only recently the safety and operation standards have reached a point that allows them to be used in a wider range of applications. At the same time, technologies for digital imaging are constantly evolving, so now it is possible to capture high quality images with a good cost-benefit ratio. The artificial intelligence field has also experienced a revolution with the development of a class of models, called deep learning, capable of extracting information from images in order to solve a variety of classification problems. As a result, the interest for drones for monitoring, tracking and detecting different types of objects has grown sharply over the last decade. This trend has manifested itself particularly intense in agriculture, with animal monitoring being among the applications that could benefit most from this type of technology.

Operating UAVs is becoming increasingly simple, especially in the case of rotary-wing aircraft ("copters"), and most drones can carry out flight missions autonomously. However, there are many aspects that, if ignored, can lead to suboptimal results, both in terms of operation and data collection and processing. This chapter aims at providing basic information on the operation of drones, as well as describing the training process and using artificial intelligence models applied to animal monitoring problems.

Keywords: drone; UAV; digital images; artificial intelligence; deep learning.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000057

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de gado é parte essencial da gestão das propriedades. Porém, esta tarefa não é trivial, especialmente em grandes propriedades adotando pecuária extensiva, algo comum em países como o Brasil. Nesse contexto, levantamentos aéreos surgem como uma opção viável. Imagens de satélite ainda não oferecem resolução espacial suficiente para identificação de animais individuais e a cobertura de nuvens ainda é um problema. O uso de aeronaves tripuladas, apesar de tecnicamente viável, possui várias desvantagens, como custo de operação, altos níveis de ruído capazes de perturbar os animais, possibilidade da ocorrência de acidentes fatais, além de que nem sempre é possível instalar os sensores de maneira apropriada. Dadas as limitações associadas a satélites e aeronaves tripuladas, o uso de drones aparece como uma opção mais vantajosa para o monitoramento de animais (Zhang; Kovacs, 2012).

Este capítulo está dividido em nove partes, além da introdução: 1) diferentes tipos de drones e suas características; 2) sensores que podem ser embarcados em drones; 3) legislação e regulamentos aplicados ao uso de drones; 4) operação prática dos drones; 5) técnicas de inteligência artificial; 6) captura e preparação das imagens; 7) treinamento dos modelos de inteligência artificial; 8) seleção dos modelos de inteligência artificial, e 9) considerações finais.

2 TIPOS DE DRONES

O tamanho dos drones pode variar de alguns poucos gramas, como o AV Nano Hummingbird, até centenas de quilogramas, como o NASA Ikhana, e a carga que eles são capazes de carregar normalmente é proporcional a seu peso. Para aplicações agrícolas, tamanhos intermediários normalmente oferecem o melhor custo-benefício, mas, em última análise, a melhor opção dependerá dos sensores necessários para a aplicação pretendida e do orçamento disponível (Barbedo; Koenigkan, 2018). Apesar de sua menor autonomia, drones elétricos são normalmente preferidos por serem mais práticos, silenciosos e estáveis que aeronaves usando combustíveis fósseis (Linchant et al., 2015).

Drones de asa rotativa (Figura 1) são pequenas aeronaves do tipo helicóptero contendo entre quatro e oito conjuntos de lâminas rotativas, arranjadas ao redor do centro da aeronave ou em dois braços opostos (Anderson; Gaston, 2013). Este tipo de drone tem como vantagens a capacidade de pairar sobre alvos fixos, conseguem ficar no ar mesmo quando um dos rotores perde potência, são pouco sujeitos a vibração, são mais fáceis de operar e tendem a ser mais baratos que aeronaves de asa fixa. Por outro lado, são relativamente lentos, o limite de carga normalmente é baixo, cobrem áreas relativamente pequenas em cada voo (Anderson; Gaston, 2013) e são instáveis com ventos acima de 25 km/h (Miller et al., 2017).

Drones de asa fixa (Figura 2) são aeronaves do tipo avião. Este tipo de VANT normalmente é lançado manualmente e pousa de barriga, de modo a minimizar os componentes necessários para lançamento e resgate (Linchant et al., 2015). Em comparação com drones de asa rotativa, tendem a ser mais rápidos, usam menos energia, operam melhor sob condições de vento forte, podem cobrir áreas maiores por voo e, normalmente, são capazes de carregar pesos maiores (Miller et al., 2017). Por outro lado, drones de asa fixa tendem a ser mais caros, são mais difíceis de operar e menos manobráveis, e as imagens tendem a exibir efeitos de borrão um pouco mais intensos, devido tanto ao movimento da aeronave quanto às vibrações associadas à sua operação.

Drones de asa rotativa e asa fixa são os mais utilizados, porém há alguns sistemas alternativos que se adaptam bem a algumas aplicações específicas. Duas dessas aeronaves alternativas podem ser apropriadas

Figura 1. Drone de asa rotativa. **Fonte:** unsplash.com. **Autor:** Aditya Chinchure.

Figura 2. Drone de asa fixa. Fonte: sensefly.com.

para uso no monitoramento de animais. Sistemas híbridos possuem características tanto de aeronaves de asa rotativa quanto de asa fixa. O quadricóptero híbrido, por exemplo, usa múltiplos rotores para decolar e pousar verticalmente, porém possui também asas fixas para poder voar distâncias mais longas (Vergouw et al., 2016). Drones do tipo dirigível (balão) podem ficar no ar por várias horas e podem levar até algumas centenas de quilogramas de carga, porém ainda há alguns desafios técnicos relacionados à sua operação prática que precisam ser superados. Outras opções menos comuns incluem drones equipados com motores a jato e ornitópteros.

3 SENSORES EMBARCADOS EM DRONES

A maioria dos drones vem equipada de fábrica com uma câmera RGB (red-green-blue) convencional (Figura 3). Porém, em princípio, qualquer tipo de sensor pode ser instalado, desde que os limites de carga sejam observados e a operação normal do drone não seja prejudicada. Vários sensores vêm sendo usados na prática, incluindo câmeras RGB, multiespectrais, hiperespectrais e termográficas, as quais são brevemente descritas a seguir. Uma descrição mais completa desses sensores pode ser encontrada em Barbedo e Koenigkan (2018).

Câmeras RGB capturam imagens usando três componentes do espectro visível (vermelho, verde e azul). Esses sensores tendem a ser baratos em comparação com outros tipos de câmeras, e as imagens produzidas fornecem uma boa aproximação da maneira como seres humanos perceberiam a cena com seus olhos.

Câmeras multiespectrais capturam imagens em comprimentos de onda específicos (entre quatro e dez bandas), cujas bandas normalmente estão localizadas na região do espectro visível e do infravermelho próximo, embora bandas termográficas também sejam capturadas em alguns casos. Alguns atributos dos objetos de interesse podem ser mais proeminentes em certos comprimentos de onda, fato este que pode ser explorado para melhorar o processo de detecção. Além disso, diferentes bandas podem ser combinadas de modo a revelar informações relevantes, como, por exemplo, os índices de vegetação. Sensores multiespectrais podem ser usados para identificar e contar animais, uma vez que diferentes espécies podem ter diferentes assinaturas espectrais (Terletzky et al., 2012). Estes sensores tendem a ter resolução espacial menor que sensores RGB.

Figura 3. Exemplo de imagem RGB.
Fonte: Luciano Vieira Koenigkan.

Como no caso de sensores multiespectrais, câmeras hiperespectrais capturam imagens em comprimentos de onda específicos, mas, neste caso, com uma resolução espectral muito mais alta, proporcionada por centenas de bandas. Este tipo de sensor ainda é caro e a resolução espectral fornecida não é necessária para detecção e contagem de animais. Porém, câmeras hiperespectrais podem ser úteis na detecção de atributos mais sutis, como raça e presença de doenças.

Câmeras termográficas detectam diferenças de temperatura usando a banda infravermelha de comprimento de onda longo (Figura 4). Estas podem ser utilizadas para detectar gado (Longmore et al., 2017) e animais selvagens (Miller et al., 2017; Witczuk et al., 2017), levando em conta o fato de que animais tendem a ter temperaturas corporais mais altas que seu entorno. Câmeras termográficas têm a vantagem de poderem ser utilizadas à noite (Linchant et al., 2015), porém possuem resolução espacial menor que outros tipos de sensores (Chabot; Bird, 2015).

4 LEGISLAÇÃO E REGULAMENTOS NO USO DE DRONES

As operações com drones são governadas por regulamentos que podem diferir entre diferentes países e que frequentemente mudam à medida que a tecnologia evolui e novos usos são vislumbrados. Nesse contexto, manter-se atualizado pode ser um desafio. As informações a seguir estavam atualizadas no momento em que este capítulo foi publicado, mas é sempre aconselhável buscar as informações oficiais mais recentes sobre o assunto.

Regras estritas ainda estão presentes em muitos países e devem sempre ser levadas em consideração antes de qualquer voo. As motivações por trás dessas restrições incluem garantir a segurança das pessoas e evitar o uso inadequado dos drones (Watts et al., 2012). À medida que a tecnologia evolui e o uso dos drones é mais bem entendido, as regras tendem a alcançar um melhor equilíbrio entre segurança e viabi-

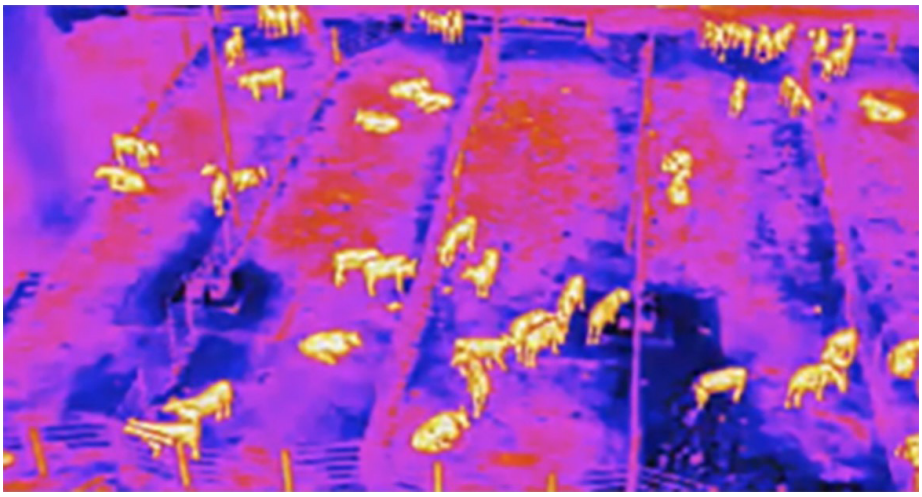


Figura 4. Exemplo de imagem termográfica. **Fonte:** Texas A&M AgriLife.

lização do uso prático. Um resumo das principais regras vigentes no Brasil, em 2022, é apresentado abaixo.

O uso de drones no Brasil é regulado pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). As principais regras vigentes são as seguintes (Agência Nacional de Aviação Civil, 2022): uma licença de pilotagem é necessária para operar aeronaves acima de 25 kg; os drones precisam manter uma distância de ao menos 30 m (horizontalmente) de qualquer pessoa, a menos que haja autorização em contrário; uma autorização especial é necessária para voos acima de 120 m de altitude ou em casos em que a aeronave sairá da linha de visão dos operadores em algum momento; voos completamente autônomos em que não haja possibilidade de intervenção imediata dos operadores são completamente vedados. Mais detalhes podem ser encontrados no *website* da ANAC.

Dentre as regras mencionadas, a necessidade de se manter permanente contato visual com o drone é provavelmente a que tem maior impacto no monitoramento de animais. Considerando-se que muitas propriedades são extensas, levantamentos amplos podem se tornar inviáveis por esta restrição. Apesar de exceções a esta regra poderem ser autorizadas, o processo pode ser complexo e demorado. É interessante notar que essa é uma situação que ocorre na maioria dos países (Chrétien et al., 2016; Colefax et al., 2017; Watts et al., 2012).

5 OPERAÇÃO DOS DRONES

Cada modelo de drone tem associado ao menos um *software* ou aplicativo para ajudar com o planejamento de rota e navegação da aeronave. Apesar de essas ferramentas serem projetadas para serem simples e intuitivas, há uma curva de aprendizado que requer tempo e dedicação para ser completada, especialmente no caso de aeronaves maiores e mais complexas. É importante dedicar tempo suficiente para aprender a utilizar essas ferramentas e a operar o drone de maneira apropriada a fim de evitar problemas. A gestão dos dados também é importante, mas a maior parte dos passos é automatizada e não requer muita atenção.

Ferramentas dedicadas ao planejamento dos voos permitem que os usuários configurem diversos parâmetros. Primeiro, é necessário localizar no mapa os pontos-âncora a serem usados pelo drone durante o voo. A ordem na qual os pontos devem ser percorridos também deve ser configurada, de modo a caracterizar adequadamente a rota a ser seguida pelo drone. A altitude de voo em relação ao solo deve também ser definida. A altitude deve ser definida de acordo com as necessidades de cada aplicação específica, desde que observados os limites legais e levando-se em consideração obstáculos capazes de causar acidentes. É importante notar que, em geral, o drone mantém sua altitude em relação ao ponto de origem, de modo que, em terrenos acidentados, a altitude em relação ao solo pode variar consideravelmente, a menos que correções sejam aplicadas. A velocidade da aeronave deve ser configurada levando-se em consideração as características do sensor utilizado e a altitude adotada, a fim de evitar imagens excessivamente borradas.

Diferentes aplicações podem ter diferentes requerimentos em relação à iluminação. Por exemplo, se sombras devem ser evitadas, os voos devem ser realizados próximos ao meio dia ou em dias nublados. Além disso, se as características ou comportamentos dos objetos a serem imageados mudam durante o dia, este fato deve ser levado em consideração no momento de escolher o horário mais apropriado para os voos. Outras aplicações podem requerer que os voos sejam

realizados em diferentes momentos do dia, a fim de caracterizar adequadamente a área e os objetos a serem analisados. Voos noturnos também são uma opção, especialmente com câmeras termográficas, mas em alguns locais esse tipo de voo pode necessitar de autorização específica.

A maioria dos drones vem equipada com câmeras que podem capturar vídeos ou imagens em intervalos que podem ser definidos pelo usuário. Porém, se outras câmeras vão ser utilizadas, mecanismos dedicados para a captura das imagens podem ser necessários. É sempre recomendável que se realizem alguns voos de teste curtos para determinar se o sistema está operando de maneira adequada, especialmente quanto uma determinada configuração está sendo utilizada pela primeira vez.

Um fator muito importante a ser considerado no planejamento das missões de imageamento é a duração das baterias e o tempo de recarga. As baterias de um drone típico permitem voos que podem variar de alguns poucos minutos até uma hora. Os tempos de recarga geralmente são mais longos; então, se múltiplos voos estão previstos, é aconselhável que se levem algumas baterias carregadas de reserva a fim de evitar longas esperas entre os voos. O número ideal de baterias depende do drone, do número de voos e da área a ser coberta.

Após a missão ser planejada e os pontos-âncora serem preenchidos na aplicação de navegação, a maior parte da operação do drone é realizada de maneira autônoma. Porém, há alguns aspectos que requerem atenção. Primeiro, é importante considerar as diferenças na operação de drones de asa rotativa e asa fixa, especialmente em relação à decolagem e ao pouso. Drones de asa rotativa decolam e pousam sem a necessidade de intervenção humana, a menos que o ambiente e as condições climáticas estejam muito desfavoráveis à operação autônoma. Em qualquer caso, é sempre recomendável seguir todo o voo visualmente a fim de que se possa intervir rapidamente no caso de ocorrer algum problema. Isso é especialmente importante durante o pouso, porque as condições podem mudar rapidamente tanto no solo quanto no ar.

Drones de asa fixa são tipicamente lançados manualmente e pousam sobre suas barrigas. O procedimento de lançamento requer prática e as condições de vento podem ter forte interferência sobre o processo. O pouso deve ser sempre realizado em local sem obstruções e em superfície relativamente macia, a fim de evitar dano à aeronave e aos sensores.

Drones modernos vêm equipados com um conjunto de sensores anticolisão capaz de evitar a maioria dos acidentes. Mesmo com essas salvaguardas, acidentes podem acontecer. Fatores de risco capazes de aumentar a ocorrência de acidentes podem ser identificados e mitigados antes dos voos. Áreas com árvores altas, por exemplo, devem ser analisadas com cuidado a fim de garantir que o drone voe confortavelmente acima das copas mais altas. Além disso, a altitude de voo é determinada em relação ao ponto de decolagem; então, se o voo começa em um local que é significativamente mais baixo que outras áreas a serem cobertas, a altitude inicial pode não ser suficiente para evitar obstáculos localizados em partes mais altas, de modo que correções devem ser aplicadas.

6 TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Técnicas de aprendizado de máquina e inteligência artificial (IA) vêm sendo utilizadas há décadas. Essas técnicas têm sido empregadas em todas as áreas de conhecimento, com diferentes graus de sucesso. Dentre estas, redes neurais provavelmente experimentaram as maiores expectativas e também as maiores decepções. Na primeira metade da década de 1990, redes neurais eram vistas como potenciais soluções para quase todos os problemas relacionados a dados. Essas expectativas se mostraram irrealistas e, apesar de redes neurais continuarem a serem aplicadas a diferentes problemas, muitos começaram a duvidar do potencial deste tipo de técnica. Porém, o desenvolvimento de uma nova família de redes neurais contendo um grande número de camadas dedicadas a tarefas específicas mudou essa visão de maneira radical. O surgimento das técnicas de aprendizado profundo nos primeiros anos da década de 2010 trouxe as redes neurais de volta aos holofotes, mas, neste caso, a maior parte da promessa inicial foi alcançada, especialmente quando dados de boa qualidade estavam disponíveis. Este tipo de técnica tem sido particularmente bem sucedido na análise e classificação de imagens, fato este que pode ser em parte atribuído à impressionante evolução experimentada por câmeras e computadores. Considerando-se que muitos dos problemas encontrados na agricultura e pecuária são inerentemente visuais, as técnicas de aprendizado profundo se popularizaram rapidamente.

Inteligência artificial e aprendizado profundo, em particular, vêm sendo aplicados com cada vez mais frequência para lidar com as condições não estruturadas e dinâmicas encontradas nos campos agrícolas. Métodos de detecção e classificação baseados em aprendizado profundo normalmente empregam Redes Neurais Convolucionais (CNNs no termo em inglês) (Krizhevsky et al., 2012; Szegedy et al., 2015; Chollet, 2017; Zoph et al., 2018). No contexto de drones para

monitoramento de gado, embora técnicas de classificação sejam utilizadas (Barbedo et al., 2019), modelos de detecção, como o YOLOv3 (Redmon; Farhadi, 2018) e o Mask R-CNN (He et al., 2017), são frequentemente preferidos, uma vez que estes têm a capacidade de indicar exatamente onde o animal está localizado (Mahmud et al., 2021). Além disso, a exata delineação dos animais pode ser alcançada através de modelos de segmentação semântica, como o Deeplab v3 (Chen et al., 2017), o SegNet (Badrinarayanan et al., 2016) e a U-Net (Ronneberger et al., 2015). Todos esses modelos têm implementações e versões pré-treinadas em diferentes plataformas, e a documentação associada é detalhada e acessível (Barbedo, 2022).

Uma consequência associada à disponibilidade de técnicas de inteligência artificial é que o número de artigos científicos empregando arquiteturas de aprendizado profundo vem aumentando continuamente. Porém, muitos desses trabalhos sofrem dos mesmos problemas, os quais frequentemente levam a resultados pouco confiáveis. Erros metodológicos sérios são comuns, indicando que mesmo os revisores dos artigos têm conhecimento limitado sobre o assunto. O objetivo desta seção é fornecer uma análise dos principais aspectos a serem considerados no fluxo normalmente adotado para treinar modelos profundos, com especial atenção dedicada aos muitos obstáculos que podem tornar os modelos gerados inadequados para uso prático.

7 CAPTURA E PREPARAÇÃO DAS IMAGENS

Por mais que as técnicas de inteligência artificial tenham evoluído nos últimos anos, modelos de boa qualidade só são viáveis se os dados usados no seu treinamento representam adequadamente o problema a ser resolvido. Nesse contexto, um dos principais desafios na construção de conjuntos de imagens para treinamento de modelos de IA é garantir que toda variabilidade associada ao problema a ser resolvido esteja adequadamente representada. Dentre os fatores que podem contribuir para o aumento da variabilidade – devendo portanto ser levados em consideração –, alguns se destacam:

- O fundo da imagem, composto por todos os pixels que não pertençam aos objetos de interesse, pode variar significativamente de acordo com a coloração do pasto, a presença de solo exposto e a presença de árvores, pedras, etc. A menos que se saiba que os locais onde o modelo gerado será aplicado possuem certas características relativamente homogêneas entre si, é importante que pelo menos a maioria dessas variações esteja presente no conjunto de imagens capturado;
- Condições de iluminação: como discutido anteriormente, convém que se determinem certos protocolos em relação ao horário de captura das imagens e às condições climáticas, a fim de existirem condições de iluminação ideais para resolver o problema. Contudo, mesmo com tais protocolos, variações de iluminação relacionadas ao ângulo de insolação, estação do ano e outros fatores ainda ocorrerão e deverão estar representadas na base de imagens;
- Variações intraclasse: no monitoramento de animais, as características visuais da pelagem são essenciais para a detecção e o reconhecimento dos indivíduos. Variações nos padrões visuais são comuns e acentuados entre diferentes raças, mas mesmo animais de uma mesma raça podem ter pelagens com características distintas. Assim, é importante que o conjunto de dados a ser utilizado no treinamento dos modelos reflita essas possíveis variações;
- Configuração dos sensores e câmeras: os modelos devem, sempre que possível, ser treinados com imagens capturadas usando todos os sensores e configurações que podem potencialmente ser encontrados durante o uso prático. Caso o modelo venha a ser utilizado sob a mesma configuração, este fator deixa de ter relevância.

Uma parte fundamental do desenvolvimento e treinamento dos modelos de IA é a anotação dos dados de referência, na qual os objetos de interesse são manualmente identificados e as classes corretas são atribuídas (por exemplo, “animal” e “não-animal”). O processo de anotação normalmente requer considerável esforço e tempo. É importante considerar que o processo de anotação é inerentemente subjetivo, o que significa que é sujeito a fenômenos cognitivos e psicológicos que podem levar a vieses, ilusões de ótica e erro (Bock et al. 2020). Apesar de existirem ferramentas para auxiliar o processo de anotação (Verma et al., 2020), estas mitigam apenas parte do problema. A solução mais apropriada, em ambos os casos, é utilizar diversas pessoas no processo para uma anotação mais confiável, reduzindo inconsistências e melhorando a qualidade e confiabilidade tanto do conjunto de dados quanto dos modelos treinados.

8 TREINAMENTO DOS MODELOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Modelos de aprendizado profundo podem ser implementados usando diferentes linguagens de programação, sendo Python a linguagem mais utilizada. Há muitos tutoriais disponíveis *online* com instruções

claras sobre como treinar e usar os modelos de aprendizado profundo.

Experimentos envolvendo aprendizado de máquina e aprendizado profundo, em particular, precisam ser planejados cuidadosamente a fim de gerar o melhor modelo possível. Dentre os aspectos que precisam ser considerados, alguns são particularmente importantes:

- Arquiteturas: à medida que a inteligência artificial evolui, novas arquiteturas surgem e novas estruturas são incorporadas aos modelos. Além das arquiteturas padrão, é possível combinar diferentes elementos de modo a gerar novas arquiteturas especificamente devotadas ao problema sendo tratado. A decisão sobre qual estratégia adotar depende de alguns fatores. Arquiteturas customizadas têm o potencial de levar a resultados melhores, mas a busca pela estrutura ideal pode demandar um processo experimental longo e complexo, sem qualquer garantia de que o desempenho do modelo adotado será melhor que aquele obtido usando arquiteturas padrão. O aprendizado de máquina automatizado oferecido por ferramentas, como AutoSklearn e Pycaret, pode ajudar na seleção dos melhores modelos. Se arquiteturas existentes são empregadas, é importante considerar que, em geral, há um compromisso entre desempenho e complexidade e tamanho da rede. A seleção da arquitetura mais apropriada deve se basear numa análise cuidadosa desses fatores;
- Transferência de aprendizado: a fim de evitar desperdício de tempo e recursos computacionais, a maioria das arquiteturas padrão tem disponíveis versões pré-treinadas usando conjuntos de dados, como o ImageNet (Deng et al., 2009). A transferência de aprendizado normalmente funciona bem, sendo efetiva em acelerar a convergência da rede. Apesar de haver casos em que o treinamento "do zero" é uma melhor opção, a maior parte dos estudos indica que a transferência de aprendizado é frequentemente a melhor opção;
- Parâmetros a serem otimizados: redes neurais profundas têm diversos parâmetros que podem ser otimizados, tais como tamanho do minibatch, taxa de aprendizado e tamanho de entrada, entre outros. Como o treinamento deste tipo de rede é em geral demorado, normalmente não é viável testar todas as combinações de parâmetros. A melhor estratégia é testar alguns parâmetros selecionados separadamente até que os valores mais apropriados sejam encontrados;
- Balanço de classes: se o número de amostras varia demais entre as classes, o treinamento pode favorecer as mais numerosas, causando vieses severos. É boa prática igualar o número de amostras entre as diferentes classes, seja limitando o número de amostras das classes mais numerosas, seja pela aplicação de aumentação às amostras das classes menores;
- Aumentação de dados: esta técnica é frequentemente utilizada para aumentar artificialmente o tamanho do conjunto de dados e a variabilidade dos dados usados para treinamento. Aumentação pode também ser utilizada para balancear as classes. As operações de aumentação mais comuns incluem rotação, inversão e deslocamento de imagens, equalização de histograma, melhoria de contraste e equalização adaptativa (Barbedo, 2018). Aumentação pode ser uma ferramenta útil, especialmente se o conjunto de imagens é relativamente pequeno, porém não deve ser aplicada indiscriminadamente. Em primeiro lugar, aumentação deve ser aplicada somente ao conjunto de treinamento. É possível aplicar aumentação ao conjunto de teste após a divisão em subconjuntos, mas normalmente isso é desnecessário. Se a aumentação é aplicada antes da separação nos conjuntos de treinamento e teste, a subsequente divisão em subconjuntos pode fazer com que imagens similares, apenas com pequenas variações, estejam presentes em ambos os conjuntos, causando forte viés nos resultados obtidos. Além disso, se um número excessivo de operações de aumentação é aplicado, o conjunto de treinamento pode se tornar excessivamente redundante, o que pode levar a efeitos inesperados na maneira como a rede é treinada. Infelizmente, muitos artigos revisados por pares publicados cometem este erro, fato este frequentemente utilizado como justificativa para perpetuação do problema (Sladojevic et al., 2016; Liu et al., 2018; Zhang et al., 2018; Jiang et al., 2019);
- Procedimento de treinamento/teste: as proporções mais utilizadas para os conjuntos de treinamento e teste são 70%/30% e 80%/20%. Alguns estudos adotam também um subconjunto de validação, normalmente contendo 10% de todas as amostras, a fim de testar a acurácia do modelo à medida que o treinamento progride. Essas proporções estão bem estabelecidas e, em geral, não precisam ser alteradas. O número ideal de épocas a ser adotado para treinamento depende da velocidade de convergência, a qual é fortemente dependente das características dos dados e do número de classes. Uma vez que a acurácia começa a estabilizar, o treinamento deve ser interrompido a fim de evitar desperdício de tempo e o fenômeno de "overfitting", o qual pode causar perda de generalidade. Outros aspectos do processo de treinamento, como taxa de apren-

dizado, tipo de otimizador, tamanho do *minibatch*, etc., normalmente são determinados caso a caso. Uma boa referência para esses valores são os códigos disponíveis *online* dedicados a aplicações similares, de modo que poucas pessoas dedicam tempo significativo otimizando esses valores;

- Validação cruzada: esta estratégia é de fundamental importância na produção de resultados confiáveis. Especialmente em casos em que o conjunto de dados não possui muita variação, se uma única partição de dados é utilizada, as distribuições dos conjuntos de treinamento e teste podem ter fortes vieses, inadvertidamente favorecendo ou penalizando os modelos sendo comparados. Em outras palavras, viés causado por distribuições de dados desfavoráveis pode levar a resultados fortemente enviesados e irrealistas. A maneira mais efetiva de evitar essa situação é pela aplicação de validação cruzada com ao menos cinco repetições (5-fold);
- Conjuntos de dados independentes: "covariate shift" é o fenômeno no qual diferenças nas distribuições dos dados usados para treinamento e teste do modelo resultam em baixa acurácia (Barbedo, 2022). Em muitos casos, apesar de os conjuntos de treinamento, teste e validação serem distintos, normalmente as amostras vêm do mesmo conjunto de dados, naturalmente possuindo certa correlação entre eles. De fato, é comum que haja uma drástica redução de acurácia quando modelos treinados são aplicados a conjuntos de imagens independentes (Ferentinos, 2018; Mohanty et al., 2016). Há algumas maneiras de mitigar este problema, especialmente através de técnicas de adaptação de domínio, mas, para resultados mais realistas, é sempre recomendável empregar conjuntos de dados separados para avaliar os modelos.

9 SELEÇÃO DOS MODELOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Normalmente, várias arquiteturas distintas são testadas para seleção do melhor modelo. Dentre os fatores que devem ser considerados para orientar a seleção final, três são particularmente importantes: acurácia, complexidade do modelo e capacidade de generalização.

Há muitas possíveis medidas para avaliar a acurácia do modelo, dependendo do tipo de problema a ser resolvido, tais como precisão e revocação, no caso de problemas de classificação, e Interseção sobre União (IoU), no caso de problemas de segmentação. Acurácia é o critério mais óbvio para escolha do modelo, mas pode não ser suficiente para apontar a melhor opção.

A complexidade do modelo também pode ser importante em certos contextos. O processo de treinamento de redes neurais profundas é quase sempre computacionalmente intenso, às vezes demandando dias ou mesmo semanas, para ser completado. Por outro lado, a maior parte dos modelos treinados pode ser executada em equipamentos com poder computacional limitado, mas aplicações em tempo real podem às vezes exigir modelos mais leves para serem viáveis.

Em algumas circunstâncias, os modelos podem alcançar acurácias muito elevadas durante seu desenvolvimento, mas falhar sob condições reais, indicando pouco poder de generalização. Como os dados a serem utilizados quase sempre possuem lacunas na sua representatividade, é importante que a arquitetura adotada tenha boa capacidade de generalização para lidar com os casos omitidos. Este fator não é fácil de avaliar, mas é de fundamental importância para avaliar o potencial do modelo. Este fato novamente destaca a importância de se utilizarem conjuntos de dados independentes para avaliar os modelos, como discutido anteriormente.

10 USO PRÁTICO DOS MODELOS E TECNOLOGIAS

No contexto da pesquisa acadêmica, o trabalho frequentemente termina quando o modelo é treinado e avaliado, e os resultados são publicados. Porém, se o modelo será usado em aplicações práticas, há alguns outros desafios e passos que precisam ser considerados.

Como discutido anteriormente, é importante conhecer a capacidade de generalização do modelo, isto é, quão preparado o modelo está para lidar com imagens provenientes de diferentes sensores, regiões e estações do ano. Em geral, é difícil construir conjuntos de dados que cubram toda a gama de variações. Como resultado, na prática, haverá situações para as quais o modelo não foi treinado apropriadamente. Na prática, isso significa que resultados confiáveis só são esperados em situações similares àquelas encontradas no conjunto de treinamento original. Esta é quase certamente a principal razão para a ausência de tecnologias baseadas em drones e imagens suficientemente confiáveis para o monitoramento de animais. A solução mais óbvia seria adicionar mais variabilidade ao conjunto de dados, mas isso leva tempo e nem sempre é viável. Isto posto, dependendo das características do problema e do modelo adotado, pode haver certa robustez a situações não presentes no conjunto de treinamento. Determinar a gama de situações para a qual o modelo pode ser aplicado não é simples e normalmente requer pesquisas adicionais. Uma maneira de se alcançar esse objetivo é convencer alguns

parceiros – de preferência, pecuaristas – a testarem a tecnologia e reportar problemas quando estes ocorrerem. Esta estratégia não somente permite um delineamento mais fino da tecnologia, mas gera mais amostras que podem ser utilizadas para retreinar o modelo. Em qualquer caso, isto envolve ações que vão muito além dos desafios técnicos envolvidos no problema.

Uma alternativa que vem produzindo resultados promissores é o uso de técnicas de adaptação de domínio. Estas técnicas são um caso particular da transferência de aprendizado que exploram os dados rotulados em um ou mais domínios relacionados para aprender um classificador capaz de lidar com dados desconhecidos ou não rotulados no domínio alvo (Csurka, 2017). Em outras palavras, as características dos novos dados a serem processados pelo modelo são artificialmente alteradas para se tornarem mais próximas às características dos dados usados para treinamento. Por exemplo, se o modelo foi treinado apenas com imagens capturadas com tempo limpo e luz solar direta, mas tem de lidar com imagens capturadas com tempo nublado, teoricamente estas últimas podem ser alteradas para se aproximarem das características das primeiras, potencialmente reduzindo as taxas de erro. Este tipo de estratégia está sendo estudada ativamente e provavelmente será aplicada com mais frequência no futuro próximo.

Finalmente, é importante considerar que nenhuma tecnologia baseada em IA é perfeita. Uma característica interessante de modelos de aprendizado profundo é o fato destes não apenas fornecerem uma classificação/detecção, mas também o grau de confiança daquela resposta. É uma boa ideia fornecer essa informação aos usuários a fim de enfatizar que erros podem ocorrer e que as respostas fornecidas por tecnologias de IA não devem ser aceitas cegamente. Na verdade, o principal objetivo de tecnologias de IA aplicadas a agricultura e pecuária é prover informações confiáveis para ajudar no processo de tomada de decisões. A ideia não é eliminar o envolvimento humano e sim preencher lacunas de informação que poderiam levar a decisões erradas. É importante ter este fato em mente, porque se tais lacunas não existem, o emprego deste tipo de tecnologia pode ser redundante e até mesmo introduzir ruído no processo de tomada de decisão.

11 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de algoritmos de inteligência artificial e de redes neurais profundas, em particular, vem crescendo constantemente em várias e diferentes aplicações, incluindo aquelas relevantes à pecuária. Apesar de os passos para gerar modelos treinados serem relativamente simples, há muitas sutilezas metodológicas que são frequentemente ignoradas, levando a resultados pouco confiáveis. O objetivo deste capítulo foi oferecer um guia para explorar as capacidades dos drones da maneira mais efetiva possível no contexto do monitoramento de gado, bem como melhorar a aplicabilidade prática dos modelos e aplicações baseados em imagens capturadas por drones.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial nº 94/2017 (RBAC-E nº 94/2017)**. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones. Acesso em: 10 maio 2022.

ANDERSON, K.; GASTON, K. J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 11, n. 3, p. 138-146, 2013. DOI: http://doi.org/10.1890/120150.

BADRINARAYANAN, V., KENDALL, A., CIPOLLA, R. SegNet: a deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation. **arXiv**, v. 1511.00561v3, p. 1-14, 2016.

BARBEDO, J. G. A. Deep learning applied to plant pathology: the problem of data representativeness. **Tropical Plant Pathology**, v. 47, n. 1, p. 85-94, 2022. DOI: http://doi.org/10.1007/s40858-021-00459-9.

BARBEDO, J. G. A.; KOENIGKAN, L. V.; SANTOS, T. T.; SANTOS, P. M. A study on the detection of cattle in UAV images using deep learning. **Sensors**, v. 19, n. 24, p. 5436, 2019. DOI: http://doi.org/10.3390/s19245436.

BARBEDO, J. G. A. Impact of dataset size and variety on the effectiveness of deep learning and transfer learning for plant disease classification. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 153, p. 46-53, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.013.

BARBEDO, J. G. A.; KOENIGKAN, L. V. Perspectives on the use of unmanned aerial systems to monitor cattle. **Outlook on Agriculture**, v. 47, n. 3, p. 214-222, 2018. DOI: http://doi.org/10.1177/0030727018781876.

BOCK, C. H.; BARBEDO, J. G. A.; PONTE, E. M. D.; BOHNENKAMP, D.; MAHLEIN, A. K. From visual estimates to fully automated sensor-based measurements of plant disease severity: status and challenges for improving accuracy. **Phytopathology Research**, v. 2, n. 1, p. 9, 2020. DOI: http://doi.org/10.1186/s42483-020-00049-8.

CHABOT, D.; BIRD, D. M. Wildlife research and management methods in the 21st century: where do unmanned aircraft fit in? **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, v. 3, n. 4, p. 137-155, 2015. DOI: http://doi.org/10.1139/juvs-2015-0021.

CHEN, L. C.; PAPANDREOU, G.; SCHROFF, F.; ADAM, H. Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation. **arXiv**, v. 1706.05587v3, p. 1-14, 2017.

CHOLLET, F. Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions. In: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION, 2017, Honolulu. **Proceedings [**...]. Honolulu: Hawaii Convention Center, 2017. p. 1800-1807.

CHRÉTIEN, L. P.; THÉAU, J.; MÉNARD, P. Visible and thermal infrared remote sensing for the detection of white-tailed deer using an unmanned aerial system. **Tools and Technology**, v. 40, n. 1, p. 181-191, 2016. DOI: http://doi.org/10.1002/wsb.629.

COLEFAX, A. P.; BUTCHER, P. A.; KELAHER, B. P. The potential for unmanned aerial vehicles (UAVs) to conduct marine fauna surveys in place of manned aircraft. **ICES Journal of Marine Science**, v. 75, n. 1, p. 1-8, 2017. DOI: http://doi.org/10.1093/icesjms/fsx100.

CSURKA, G. Domain adaptation for visual applications: a comprehensive survey. **arXiv**, v. 1702.05374v2, p. 1-46, 2017.

DENG, J.; DONG, W.; SOCHER, R.; LI, L. J.; LI, K.; FEI-FEI, L. Imagenet: A large-scale hierarchical image database. In: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION, 2009, Miami. **Proceedings [**...]. Miami: Convention Center, 2009. p. 248-255.

FERENTINOS, K. P. Deep learning models for plant disease detection and diagnosis. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 145, p. 311-318, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.009.

HE, K.; GKIOXARI, G.; DOLLÁR, P.; GIRSHICK, R. Mask R-CNN. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER VISION, 2017, Veneza: **Proceedings [**...]. Venice: Venice Convention Center, 2017. p. 2980-2988.

JIANG, P.; CHEN, Y.; LIU, B.; HE, D.; LIANG, C. Real-time detection of apple leaf diseases using deep learning approach based on improved convolutional neural networks. **IEEE Access:** Practical Innovations, Open Solutions, Piscataway, v. 7, p. 59069-59080, 2019. DOI: http://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2914929.

KRIZHEVSKY, A.; SUTSKEVER, I.; HINTON, G. E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In: ANNUAL CONFERENCE ON NEURAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS, 2012, Lake Tahoe. **Proceedings** [...]. Lake Tahoe: Harrahs and Harveys, 2012. p. 1106–1114.

LINCHANT, J.; LISEIN, J.; SEMEKI, J.; LEJEUNE, P.; VERMEULEN, C. Are unmanned aircraft systems (UASs) the future of wildlife monitoring? A review of accomplishments and challenges. **Mammal Review**, v. 45, n. 4, p. 239-252, 2015. DOI: http://doi.org/10.1111/mam.12046.

LIU, B.; ZHANG, Y.; HE, D.; LI, Y. Identification of apple leaf diseases based on deep convolutional neural networks. **Symmetry**, v. 10, n. 1, p. 11, 2018. DOI: http://doi.org/10.3390/sym10010011.

LONGMORE, S.; COLLINS, R.; PFEIFER, S.; FOX, S. E.; MULERO-PAZMANY, M.; BEZOMBES, F.; GOODWIND, A.; JUAN OVELAR, M.; KNAPEN, J. H.; WICH, S.A. Adapting astronomical source detection software to help detect animals in thermal images obtained by unmanned aerial systems. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 8-10, p. 2623-2638, 2017. DOI: http://doi.org/10.1080/01431161.2017.1280639.

MAHMUD, M. S.; ZAHID, A.; DAS, A. K.; MUZAMMIL, M.; KHAN, M. U. A systematic literature review on deep learning applications for precision cattle farming. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 187, p. 106313, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106313.

MILLER, J. O.; ADKINS, J.; TULLY, K. **Providing aerial images through UAVs**. Fact Sheet FS-1056. 2017. Disponível em: https://drum.lib.umd.edu/handle/1903/19168. Acesso em 10 maio 2022.

MOHANTY, S. P.; HUGHES, D. P.; SALATHÉ, M. Using deep learning for image based plant disease detection. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 1419, 2016. DOI: http://doi.org/10.3389/fpls.2016.01419.

REDMON, J., FARHADI, A. Yolov3: an incremental improvement. **arXiv**, v. 1804.02767v1, 2018.

RONNEBERGER, O.; FISCHER, P.; BROX, T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In: MAHMUD, M. S.; ZAHID, A.; DAS, A. K.; MUZAMMIL, M.; KHAN, M. U. (eds.). **Medical image computing and computer--assisted intervention – MICCAI 2015**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 234-241.

SLADOJEVIC, S.; ARSENOVIC, M.; ANDERLA, A.; CULIBRK, D.; STEFANOVIC, D. Deep neural networks based recognition of plant diseases by leaf image classification. **Computational Intelligence and Neuroscience**, v. 2016, p. 3289801, 2016. DOI: http://doi.org/10.1155/2016/3289801.

SZEGEDY, C.; LIU, W.; JIA, Y.; SERMANET, P.; REED, S.; ANGUELOV, D.; ERHAN, D.; VANHOUCKE, V.; RABINOVICH, A. Going deeper with convolutions. In: IEEE CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION, 2015, Boston. **Proceedings [**...]. Boston: Convention Center, 2015. p. 1-9.

TERLETZKY, P.; RAMSEY, R. D.; NEALE, C. M. U. Spectral characteristics of domestic and wild mammals. **GIScience & Remote Sensing**, v. 49, n. 4, p. 597-608, 2012. DOI: http://doi.org/10.2747/1548-1603.49.4.597.

VERGOUW, B.; NAGEL, H.; BONDT, G.; CUSTERS, B. Drone technology: types, payloads, applications, frequency spectrum issues and future developments. In: CUSTERS, B. (ed.). **The future of drone use. Information technology and law series**. The Hague: T.M.C. Asser Press, 2016. v. 27, p. 21-45.

VERMA, S.; BHATIA, A.; CHUG, A.; SINGH, A. P. Recent advancements in multimedia big data computing for iot applications in precision agriculture: opportunities, issues, and challenges. In: TANWAR, S.; TYAGI, S.; KUMAR, N. (ed.). **Multimedia Big Data Computing for IoT Applications. Intelligent Systems Reference Library.** Singapore: Springer, 2020. v. 163, p. 391-416. http://doi.org/10.1007/978-981-13-8759-3_15.

WATTS, A. C.; AMBROSIA, V.; GAND HINKLEY, E. A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use. **Remote**

Sensing, v. 4, n. 6, p. 1671-1692, 2012. DOI: http://doi.org/10.3390/rs4061671.

WITCZUK, J.; PAGACZ, S.; ZMARZ, A.; CYPEL, M. Exploring the feasibility of unmanned aerial vehicles and thermal imaging for ungulate surveys in forests – preliminary results. **International Journal of Remote Sensing**, v. 39, n. 15-16, p. 5504-5521. 2017. DOI: http://doi.org/10.1080/01431161.2017.1390621.

ZHANG, C.; KOVACS, J. M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 693-712, 2012. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5.

ZHANG, S.; WANG, H.; HUANG, W.; YOU, Z. Plant diseased leaf segmentation and recognition by fusion of superpixel, k-means and phog. **Optik**, v. 157, p. 866-872, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.11.190.

TEXAS A&M AGRILIFE, 2024. Disponível em: https://agrilife.tamu.edu/. Acesso em: 26 jul. 2024.

ZOPH, B.; VASUDEVAN, V.; SHLENS, J.; LE, Q. V. Learning transferable architectures for scalable image recognition. **arXiv**, v. 1707.07012v4, p. 1-14, 2018.

Ciência de dados aplicada à pecuária de corte

71

Data science applied to beef cattle production

Thaís Basso Amaral[1], Guilherme Jordão de Magalhães Rosa[2], Marcos Cezar Visoli[3], Fabio Martins Guerra Nunes Dias[4]

[1] *Pesquisadora Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, thais.amaral@embrapa.br*
[2] *Professor, Department of Animal and Dairy Sciences, University of Wisconsin, Madison (WI), EUA, grosa@wisc.edu*
[3] *Pesquisador Embrapa Agricultura Digital, Campinas (SP), Brasil, marcos.visoli@embrapa.br*
[4] *Friboi - JBS S.A., São Paulo (SP), Brasil, fabio.dias@friboi.com.br*

RESUMO

Com o crescimento da utilização de dispositivos móveis, do uso de sensores, do aumento da conectividade no campo, dados estão sendo coletados a uma taxa exponencialmente crescente nos sistemas de produção pecuários. Diariamente são gerados dados climáticos, provenientes de satélites, índices de vegetação, dados econômicos, isso sem contar os dados coletados nas propriedades, como ganho de peso, consumo de alimentos, qualidade de carcaça etc. De forma isolada esses dados podem auxiliar o produtor na tomada de decisão, porém quando combinados podem gerar *insights* valiosos para toda a cadeia. Ao projetar tendências futuras, pode-se otimizar a alocação de recursos, tornando toda a cadeia produtiva mais sustentável. Neste capítulo será abordado como o big data e o analytics podem contribuir para a geração de valor na cadeia da carne e superar os desafios que a pecuária de corte vem enfrentando.

Palavras-chave: análise de dados; big data; inteligência artificial; produção pecuária.

ABSTRACT

With the increasing use of mobile devices and sensors, and growing connectivity in the field, data is being collected at an exponentially increasing rate in livestock production systems. Climate data are generated daily from satellites, vegetation indices, and economic data, as well as data collected from properties, including weight gain, food consumption, carcass quality, etc. In isolation, such data can assist the producer during decision-making, but in aggregate, they provide valuable insights for the entire production chain. When projecting future trends, it is possible to optimize resource allocation, making the entire production chain more sustainable and efficient. This chapter discusses how big data and analytics can contribute to generating value in the meat production chain and help solve the challenges that beef cattle production faces.

Keywords: analytics; artificial intelligence; beef production; big data.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000063

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade da pecuária de corte depende da otimização contínua de um sistema extremamente complexo envolvendo técnicas de manejo animal, melhoramento genético, instalações e equipamentos, insumos, transporte animal e processamento e comercialização dos produtos de origem animal. Tal otimização envolve não somente a melhoria da produtividade (i.e., produção por unidade de área) mas também a eficiência da produção em termos da utilização de insumos, incluindo energia e água, de maneira a garantir retorno econômico satisfatório ao produtor com mínimo impacto ambiental. Além disso, a produção animal moderna deve corresponder também às novas exigências de consumidores em termos de qualidade de produto, bem-estar animal e preservação da biodiversidade.

Dada essa complexidade do sistema produtivo e dos vários fatores que devem ser considerados para a sustentabilidade da pecuária, o produtor rural e a indústria pecuária em geral têm que tomar decisões continuamente e em tempo real, num contexto dinâmico de disponibilidade e de mudanças de preço de insumos e produtos, de novas exigências de mercado, interno e externo, da incidência de doenças, mudanças de clima etc. Tais decisões só podem ser otimizadas se tomadas de maneira objetiva e baseadas em dados.

A cadeia da carne bovina é longa e complexa, caracterizando-se pela enorme quantidade de fornecedores de animais, de ambientes de produção, raças e tecnologias de criação muito diferentes. Com o aumento da capacidade de armazenamento e processamento de dados, o uso de sensores no campo, o acesso à internet, a pecuária vem se tornando cada vez mais orientada a dados, sendo fundamental para apoiar a tomada de decisões a nível da fazenda (Morota et al., 2018).

Os grandes volumes ou coleções de dados podem ser uma fonte valiosa de informações para efetivamente gerar impacto e apoiar as demandas que vêm sendo enfrentadas pelo setor (Kamilaris et al., 2017; Liakos et al., 2018; Morota et al., 2018). As organizações terão de desenvolver abordagens inteligentes para traduzir os dados em percepções acionáveis e monetizáveis (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2022). Plataformas digitais que geram dados estão crescendo constantemente. Big data, modelos preditivos, ciência de dados e data analytics estão ajudando a revolucionar o agro, revelando que é possível otimizar tudo com maior capacidade de armazenamento, processamento e análise, produzir novos conhecimentos para o negócio e para o produtor, assim como traçar tendências e prever o futuro. O desafio é fazer o big data chegar aos pequenos e aos grandes produtores, pois isso exigirá crescentemente profissionais com habilidades digitais, de reflexão (questionadores) e atentos ao ambiente de negócios (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2022).

Neste capítulo serão abordados alguns conceitos relacionados à temática, além de demonstrar alguns exemplos de como a ciência de dados pode contribuir para os desafios atuais da cadeia da carne bovina.

2 TIPOS E FONTES DE DADOS

A ciência de dados consiste na tomada de decisão baseada em dados. Isso se dá a partir do tratamento de uma imensidão e diversidade de dados brutos, a fim de transformá-los em informações de valor, para realizar análises escaláveis, velozes e precisas, e, dessa forma, gerar insights para decisões mais assertivas, consequentemente, otimização e expansão dos negócios.

Nesse contexto, torna-se imprescindível a mensuração e obtenção de dados de várias fontes, não somente de informação de "dentro da porteira", como inventário de rebanho, taxas produtivas e reprodutivas, compra e venda de insumos e produção, mas também dados macroeconômicos, dados climáticos, dados de sensores orbitais, de transporte de animais entre fazendas e de fazendas para a indústria de processamento, e tantos outros (Figura 1). Tais conjuntos de dados são gerados por agentes e instituições independentes, como associações de criadores, agências do governo e agências não governamentais, outras entidades públicas e privadas etc. Um primeiro passo nesse contexto de tomadas de decisão baseadas em dados requer a junção de tais repositórios de dados independentes para a geração de data lakes, ilustrados na Figura 2, os quais se referem a banco de dados multidimensionais com informação espaço-temporal. Tal junção ou pareamento de repositórios de dados pode se dar tendo entidade jurídica como variável comum (e.g. nome da fazenda ou CNPJ), ou data (como no caso de valores econômicos), ou informação espacial (como município ou coordenada geográfica), ou combinação de tais variáveis, como no caso de tempo, temperatura e índice pluviométrico (em determinado local e data) ou imagens de satélite.

A diversidade de dados em relação ao seu tipo, origem, tamanho, frequência de atualização e demais características inerentes dos processos que os originam leva ao desafio de como organizá-los e adequá-los para potencializar análises e obtenção de informações úteis para tomada de decisão no momento necessário.

Figura 1. Representação de diferentes fontes de dados e como elas se relacionam de forma a compor um grande conjunto de dados ou big data.

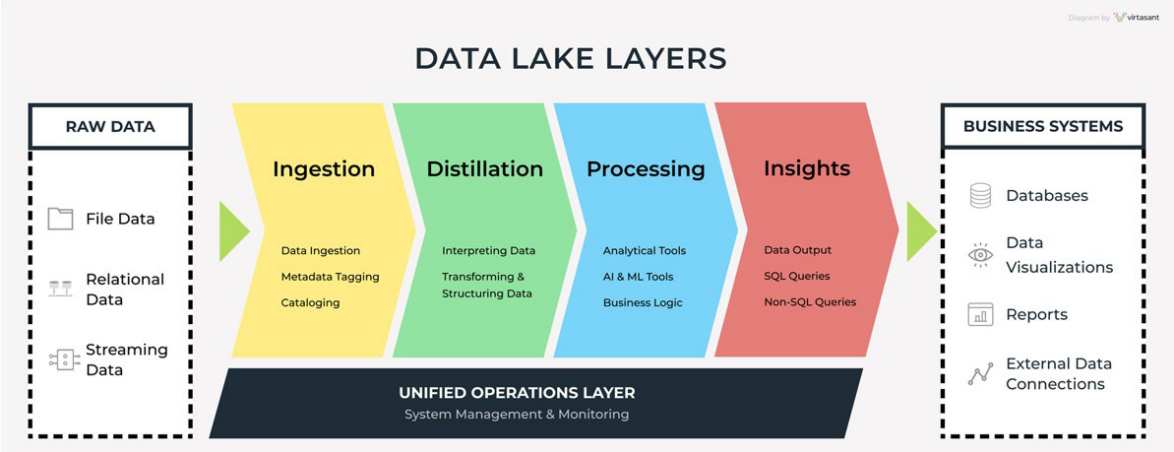


Figura 2. Esquematização da estruturação de dados em data lakes.
Fonte: Hajdarbegovic (2020).

Nesse contexto, a área de gestão de dados vem ganhando destaque, seja em ambientes empresariais quanto nas comunidades e instituições de pesquisa, onde o termo utilizado é gestão de dados de pesquisa.

Segundo o Guia Dama-Dmbok v2 (DAMA International, 2017), a gestão de dados é a função na organização que cuida do planejamento, controle e entrega de ativos de dados e de informação. Esta função inclui as disciplinas do desenvolvimento, execução e supervisão de planos, políticas, programas, projetos, processos, práticas e procedimentos que controlam, protegem, distribuem e aperfeiçoam o valor dos ativos de dados e informações. Pode-se entender também gestão de dados como uma área ou conjunto de disciplinas responsável por prezar pelos dados da organização, fazendo com que sejam únicos, íntegros, confiáveis e disponíveis para as pessoas que realmente precisam ter acesso.

Baseado no Dama-Dmbok v2, foram definidas 11 áreas de atuação para a sua efetiva implementação, representadas na Figura 3 e descritas posteriormente.

- Governança de dados, que envolve planejamento, supervisão e controle sobre o gerenciamento de dados e o uso de dados e recursos relacionados a dados.

Figura 3. Framework de gestão de dados. Figura adaptada/traduzida de DAMA-DMBOK®V2 (DAMA International, 2017).

- Arquitetura de dados, que define a estrutura geral de dados e recursos relacionados a dados como uma parte da arquitetura da empresa.
- Modelagem e design de dados, que envolvem as tarefas de análise, projeto, construção, testes e manutenção.
- Armazenamento e operações de dados, com as ações de implantação de armazenamento de ativos de dados físicos estruturados e gestão.
- Segurança de dados, que envolve a privacidade, confidencialidade, acesso apropriado, questões legais ligadas a legislações como a LGPD.
- Integração de dados e interoperabilidade, que consiste nos processos de aquisição, extração, transformação, movimento, entrega, replicação, federação, virtualização e suporte operacional.
- Documentos e conteúdo, com as funções relacionadas aos processos de armazenar, proteger, indexar e habilitar o acesso aos dados encontrados em fontes não estruturadas e de disponibilização desses dados para integração e interoperabilidade com dados estruturados.
- Dados mestre e referência, que envolvem o gerenciamento dos dados compartilhados para reduzir a redundância e garantir a qualidade de dados através da definição padronizada e do uso de valores de dados.
- Data Warehousing e Business Intelligence: item amplo, que envolve o gerenciamento de processamento de dados analíticos e permitindo acesso a dados de suporte à decisão para relatórios e análises.
- Metadados, envolvendo coleta, categorização, integração, controle e entrega de metadados.
- Qualidade dos dados, com a definição, monitoramento e manutenção da integridade dos dados e melhoria da qualidade dos dados.

A implantação dessas áreas e funções pode demandar planejamento e investimento a médio e longo prazo em instituições. Abordagens mais simplificadas podem ser aplicadas de acordo com o tamanho e finalidade da instituição ou do trabalho a ser realizado, mas é importante destacar que a gestão de dados é fundamental na atualidade.

3 TIPOS DE ANÁLISES

Após a junção dos dados e editoração dos mesmos para eliminação de redundâncias e controle de qualidade para redução de possíveis erros e valores discrepantes, tais data lakes podem então ser utilizados para a tomada de decisões. Para tanto, eles precisam ser processados utilizando-se métodos estatísticos e computacionais adequados para a análise de dados de grandes dimensões, i.e., big data, os quais requerem recursos computacionais apropriados para manejo e administração dos dados, bem como técnicas eficientes de mineração de dados. A análise de dados e geração de informação necessária para a tomada eficiente de decisões pode ser dividida em três grupos, como ilustrado na Figura 4. Numa primeira etapa, os dados são sumarizados utilizando-se técnicas de ***estatística descritiva***, como o cálculo de medidas de tendência central (como média e mediana), medidas de variabilidade (como desvio padrão, diferença entre maiores e menores valores etc.), detecção de valores discrepantes e construção de gráficos e tabelas. Ferramentas modernas para análise descritiva eficiente de dados de grande dimensão referem-se a planilhas dinâmicas como Power BI, Tableau etc.

Como esse é um campo em franco desenvolvimento, grande quantidade de tecnologias é lançada todos os anos, porém dificilmente existirá uma ferramenta que supra todas as funcionalidades necessárias e se integre com as soluções já em uso. Por isso, o mais comum é combinar soluções *open source* com aquelas comerciais. Dentre os softwares *open source* mais utilizados estão o RStudio e o Python. O RStudio sendo mais utilizado para análises estatísticas e o Python mais utilizado por desenvolvedores de *machine learning* (aprendizado de máquina) e inteligência artificial. Para interpretação e visualização dos dados, dentre as ferramentas comerciais destacam-se o Microsoft Power BI e o Tableau. Os destaques dessas ferramentas são a capacidade de gerar representações gráficas

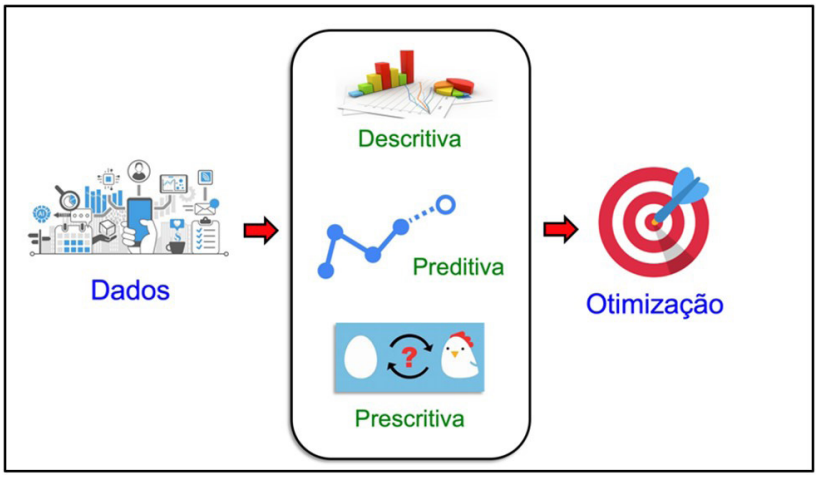


Figura 4. Dos dados à tomada de decisões: análise descritiva, preditiva e prescritiva para a tomada de decisões e otimização do sistema produtivo.

de dados e a interface que facilita a tomada de decisões sobre a forma mais adequada de extrair e interpretar dados.

Estatísticas descritivas são importantíssimas para tomadas de decisão cotidianas, como monitoramento de inventários e decisões de compra e venda, controle produtivo de rebanhos e decisões de descarte de animais, seleção genética, decisões de manejo como vacinação, inseminação, alimentação etc. Além disso, estatísticas descritivas, por mais simples que sejam, são parte fundamental de uma análise estatística mais profunda dos dados, pois auxiliam a escolha de modelos estatísticos apropriados, os quais dependem de pressuposições em relação aos dados, como distribuições probabilísticas, dependências e colinearidades, e tantas outras.

Além do componente descritivo, a análise de dados envolve modelos de predição e modelos que objetivam um melhor entendimento dos fatores envolvidos no sistema. Os modelos de predição, ou a chamada ***análise preditiva***, objetivam a previsão de resultados ou valores futuros de variáveis de interesse. Um exemplo do nosso cotidiano são os modelos utilizados na previsão do tempo. Tais modelos utilizam dados de temperatura diária, umidade, pressão e ventos para a predição de chuvas, sol e outras tantas variações climáticas. Modelos preditivos são utilizados também em econometria, por exemplo para decisão e compra e venda futura de insumos e produção. Outros exemplos que podem ser citados são a predição do ganho de peso de bovinos dado o potencial genético e o manejo alimentar dos mesmos. Modelos de predição exploram a associação da variável de interesse com as covariáveis disponíveis no modelo. Técnicas eficientes de predição são modelos de aprendizado de máquina, como máquina de vetores de suporte (SVM, do inglês *Support Vector Machine*) e rede neural artificial (ANN, do inglês *Artificial Neural Network*). Modelos de predição proporcionam informação importantíssima para a tomada de decisões. Tais decisões, entretanto, são mais no sentido de adaptação de sistemas, administração de recursos etc. do que de mudança do resultado da predição propriamente dito. Por exemplo, a partir de uma previsão de chuva forte para determinado dia, pode-se decidir adiar a distribuição de ração num confinamento bovino. Portanto, há uma adaptação da rotina do manejo alimentar do confinamento, dada a impossibilidade de mudança da previsão de chuva. O mesmo ocorre com decisões de compra e venda em mercados futuros etc. Em outras situações, se conhecemos relações de causa e efeito entre os componentes de um sistema, podemos fazer determinadas intervenções no mesmo para alterar potenciais resultados futuros. Exemplos desse tipo de decisão são: mudança na constituição da ração animal para aumento do ganho de peso ou deposição de gordura (tais decisões envolvem o conhecimento do efeito de determinados componentes da ração, como proteína, carboidrato, fibra e gordura no metabolismo animal), vacinação ou tratamento profilático para evitar doenças, fertilização de pastagens etc. Relações causais entre variáveis são comumente investigadas utilizando-se experimentos randomizados. Tais experimentos controlados são em geral conduzidos em fazendas experimentais, em universidades e instituições de pesquisa. Apesar de muito úteis, eles têm algumas desvantagens, como custo, escopo reduzido, e seus resultados nem sempre são diretamente aplicáveis no campo, em fazendas comerciais (Rosa; Valente, 2013). Nesse contexto, os data lakes proporcionam a possibilidade de se investigar relações de causa e efeito entre as variáveis presentes, utilizan-

do-se técnicas de análise de dados observacionais, muito comuns em estudos epidemiológicos, como técnicas de redes bayesianas (BN, do inglês *Bayesian Networks*) e modelos de equações estruturais (SEM, do inglês *Structural Equation Models*). Esse grupo de técnicas de análise de dados, aqui denominado ***análise prescritiva***, propicia a tomada de decisão num contexto de intervenção no sistema, para alteração e resultados (Rosa; Valente, 2013; Bello et al., 2018). Por exemplo, a partir de análise prescritiva, pode-se determinar que tipo de equipamento e instalações, protocolos de manejo reprodutivos e de saúde animal, manutenção de pastos, etc. melhoram a eficiência de produção, retorno econômico, bem-estar animal e outros critérios de performance do sistema produtivo, de maneira que intervenções específicas podem ser feitas para a otimização dos mesmos. Alguns exemplos de aplicação de análise de dados em pecuária de corte são apresentados a seguir.

4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO E PERSPECTIVAS NA PECUÁRIA DE CORTE

Como exemplos de aplicação de análise de dados em pecuária, podemos dividi-los em dois grupos: análise de dados históricos e análise de dados em tempo real. O primeiro grupo refere-se à análise de dados obtidos ao longo do tempo e armazenados por determinado período. A partir da análise dos mesmos, podem-se investigar os fatores que afetam o sistema, de maneira que intervenções específicas podem ser efetuadas no futuro para melhorar o sistema. Além disso, utilizando-se dados históricos podem ser desenvolvidos modelos preditivos para aplicação futura. Num segundo grupo tem-se a análise de dados em tempo real, onde decisões devem ser tomadas de imediato ou em curto prazo. Exemplos desse tipo de aplicação referem-se em geral a dados de sensores, como termômetros, acelerômetros, GPS, imagens etc. A partir de tais dados, decisões relativas ao tratamento dos animais, à inseminação de vacas, irrigação etc. podem ser tomadas.

Como exemplo de dados históricos têm-se as informações de rotina coletadas diariamente nas fazendas, incluindo informações de saúde e desempenho animal, vacinação e tratamento veterinário, bem como informações detalhadas sobre instalações/equipamentos e práticas de manejo. Juntamente com os dados demográficos e climáticos publicamente disponíveis, grandes coleções de dados podem ser geradas, as quais constituem uma valiosa fonte de informação para ajudar a melhorar os sistemas de produção em termos de saúde e eficiência animal e sustentabilidade da produção (Kamilaris et al., 2017; Liakos et al., 2018; Morota et al., 2018; Rosa, 2021). Como mencionado anteriormente, um primeiro desafio com dados históricos é a junção dos dados de diferentes fontes, os quais incluem diversos formatos e distribuições espaço-temporais.

Um exemplo aparentemente trivial mas muito importante na pecuária de corte foi apresentado por Aiken et al. (2019), os quais desenvolveram um procedimento automático baseado em aprendizado de máquina para combinar dados de fazendas oriundos de diferentes bancos de dados. O algoritmo desenvolvido foi aplicado na integração de dois grandes conjuntos de dados, um compreendendo 44.566 fazendas que utilizaram suplementação alimentar de uma empresa de nutrição animal (DSM) e outro com 32.776 fazendas que abateram os animais em uma empresa frigorífica (JBS). Abordagens determinísticas, estocásticas e de aprendizado de máquina foram utilizadas para classificar pares de fazendas como compatíveis ou não. As técnicas foram avaliadas em termos de qualidade de resultados (acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade), bem como eficiência (tempo de execução computacional). Em geral, os métodos de ML superaram as outras estratégias, com as técnicas supervisionadas geralmente superando as não supervisionadas. Ao final do trabalho foi possível extrair de forma automática e muito precisa as 5.204 fazendas que apareciam nos dois bancos de dados, conectando assim o consumo de produtos de nutrição animal de fazendas com os dados de qualidade de carcaça antes isolados em duas bases de dados independentes. O conjunto de dados mesclado continha informações sobre mais de 4 milhões de bovinos de corte terminados, oriundos de 5.204 fazendas presentes em ambos os conjuntos de dados originais. Em um segundo estágio de integração de dados, o conjunto de dados foi ainda enriquecido com variáveis econômicas relacionadas à produção de carne bovina, fertilidade do solo e dados climáticos de cada local de fazenda (Aiken et al., 2019).

O conjunto de dados integrado de Aiken et al. (2019) foi usado por Aiken et al. (2020) para prever a produção futura bem como a qualidade de bovinos de corte usando três metodologias: regressão linear múltipla, floresta aleatória (RF, do inglês *Random Forest*) e ANN. A técnica de validação cruzada foi utilizada para avaliar a capacidade preditiva de cada modelo, bem como a importância de cada variável. Os resultados indicaram que, para a maioria das características, o melhor modelo preditivo foi o RF. Em termos de importância variável, os modelos puderam identificar os principais fatores determinantes de varia-

ções na produção e qualidade (preço de venda de bovinos e milho, bem como consultoria técnica, além de clima e solo) e quantificar sua importância relativa. Por fim, o tempo de execução computacional e o espaço em disco necessários variaram muito entre os algoritmos, com RF e ANN sendo consideravelmente mais exigentes do que os modelos de regressão, exigindo processamento paralelo.

Outro exemplo de integração e análise de big data no contexto da otimização das práticas de gestão foi apresentado por Passafaro et al. (2019). Neste estudo, dados obtidos durante o transporte final dos suínos até o abatedouro foram relacionados com a morte ou perda total de animais. A análise dos dados utilizando técnicas de regressão com modelos mistos aditivos generalizados (Wood et al., 2017) indicou importante efeito das condições climáticas (vento/temperatura/umidade) e motorista (proprietário/contratado).

Na cadeia de bovinos, menos integrada e padronizada que a dos suínos, podemos esperar efeitos significativos das variáveis relacionadas ao transporte como distância, tempo de viagem e condições de estradas, chuvas, temperatura, tipo do caminhão e motorista sobre bem-estar dos animais, qualidade das carcaças e couro. Gomes et al. (2018) compilaram informações relativas ao abate de gado no estado de Mato Grosso do Sul representando 1,74 milhão de animais abatidos em 12 diferentes unidades frigoríficas, distribuídas por todas as regiões do estado, e conseguiram demonstrar relação entre a origem geográfica dos animais; observaram que o nível de contusões foi de 0,48% na mesorregião leste e em todas as demais menor que 0,09%, o que indica grande dependência regional também para a ocorrência de contusões nas carcaças.

Imagens de satélite, dados cadastrais das fazendas e as informações de trânsito dos bovinos relacionando viagens entre fazendas nas etapas anteriores ao abate têm se mostrado fundamentais na identificação de riscos ambientais nas diversas fazendas por onde o animal passou durante as fases de cria, recria e terminação.

Amaral et al. (2021) utilizaram ferramentas de *Business Intelligence* (BI) para análise da qualidade de carcaça dos animais oriundos do programa Proape-Precoce de Mato Grosso do Sul. O software Tableau foi utilizado para elaborar um painel para visualização e análise dos dados de forma dinâmica e pode ser acessado publicamente por meio do link https://public.tableau.com/app/profile/thais.basso.amaral/viz/PrecoceMS2/Propriedades.

Este painel vem sendo atualizado e conta atualmente com as informações relacionadas aos abates dos animais desde 2017, quando iniciou o programa até 2021. As análises podem ser feitas no painel por meio da aplicação de filtros, dependendo do nível de detalhamento que o usuário deseja. É possível filtrar um ou mais municípios, e todos os demais indicadores do painel serão ajustados para mostrar os dados referentes ao município selecionado. Também é possível selecionar somente produtores que possuem um determinado sistema de produção e da mesma forma visualizar os indicadores de qualidade, peso dos animais, número de produtores, entre outros indicadores referentes àquele sistema de produção. Inúmeras possibilidades de análises que podem ser feitas pelo usuário de forma rápida e dinâmica (Figura 5).

A Internet das Coisas, conhecida também como IoT, surgiu como termo para identificar os dispositivos de tecnologias embarcadas e a interação entre eles e a internet como constituída hoje. Conforme citado no projeto Swamp (Kamienski; Visoli, 2018), o uso das tecnologias de informação e comunicação, com esta grande diversidade e quantidade de sensores existentes, já está se disseminando no campo. Segundo pesquisa realizada por Bolfe et al. (2020), IoT está entre as tecnologias digitais emergentes preferidas para serem incorporadas ao portfólio de empresas e prestadores de serviço que atuam no agronegócio brasileiro. Na mesma pesquisa, bem-estar animal e modelos de estimativa de produtividade são assuntos que estão entre os mais atendidos por essas empresas no que tange ao uso de tecnologias digitais. Em Speranza et al. (2022) está descrita a proposta de uma arquitetura baseada em IoT para coleta, armazenamento e processamento de dados oriundos de um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), com foco no monitoramento de produtividade e bem-estar animal de bovinos. A coleta automatizada e a devida organização dos dados em tempo real, como pesagens diárias, umidade e temperatura de solo, índices de conforto térmico, por exemplo, criam as condições necessárias para a aplicação de técnicas de previsão de ganho de peso animal e da produtividade, fornecendo ao produtor critérios mais apurados para tomada de decisão em seu negócio.

O controle de doenças e sua propagação tem apresentado bons resultados quando da inclusão de informações relativas ao transporte dos animais. Passafaro et al. (2020) investigaram dados de um sistema integrado de produção suína em que os animais são transportados entre granjas após a conclusão de cada fase de produção. Relatórios de 76.566 remessas entre as granjas foram obtidos e utilizados para caracterizar o fluxo de movimento de suínos foram analisados e indicaram, de maneira geral, que as unidades de de-

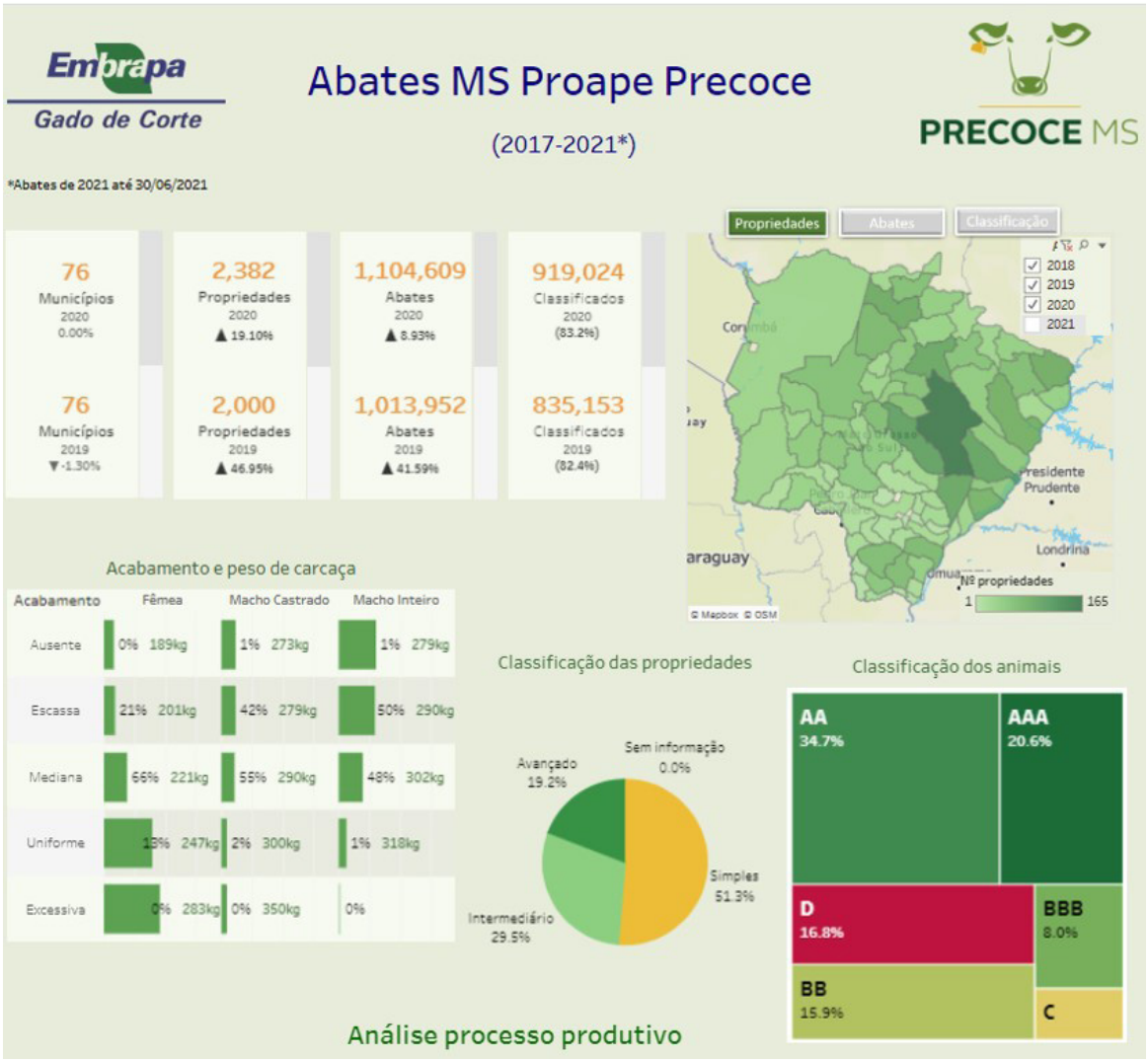


Figura 5. Painel BI dos animais abatidos no programa Proape-Precoce MS nos anos de 2017 a 2021.

senvolvimento de leitoas de reposição, maternidades e granjas de matrizes são potencialmente os principais fatores de introdução e disseminação de doenças no sistema e que somadas às características de cada doença devem certamente ser foco das políticas de biossegurança para todos os núcleos de produção.

Gomes et al. (2018) compilaram informações relativas ao abate e transporte de gado no estado de Mato Grosso do Sul, representando 1,74 milhão de animais abatidos em 12 diferentes unidades frigoríficas, distribuídas por todas as regiões do estado, e conseguiram demonstrar relação entre a origem geográfica dos animais e o descarte de carcaças pelo SIF devido à ocorrência de contaminação por cisticercose bovina, uma importante zoonose. Considerando a microrregião onde a fazenda de origem do gado estava localizada observou-se incidência média de 0,88% em todo o estado, sendo que nas duas piores microrregiões este índice chegou a 1,81% e na melhor delas apenas 0,23%. Oferecer dados de risco sanitário para cada lote embarcado nas fazendas pode melhorar a precisão das políticas de aquisição de matéria-prima da indústria e de fazendas de terminação.

Para finalizar, a análise de dados de sensores em geral coletados em tempo real tem sido cada vez mais comum com o advento de técnicas de pecuária de precisão, como monitoramento e tomada de decisão em nível individual de cada animal ou de grupos de animais (Berckmans, 2017; Benjamin; Yik, 2019; Rosa, 2021). Dentre as várias tecnologias de sensores, a utilização de análise de imagens e visão computacional tem se mostrada bastante promissora (Fernandes et al., 2020), como por exemplo com imagens de profundidade ou 3D, imagens digitais coloridas (ou RGB, do inglês *Red Green Blue*), imagens termais, ou imagens de infravermelho. Exemplos de aplicações em bovinos podem ser encontrados em Cominotte et al. (2020), com a utilização de imagens 3D para a predição de

peso corporal e ganho de peso de bovinos de corte, e em Ferreira et al. (2022) no reconhecimento de bovinos a partir de imagens 3D.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um aumento na aplicação de big data analytics em ciências animais tem sido observado nos últimos anos. Ao projetar tendências futuras, pode-se otimizar a alocação de recursos, tornando toda a cadeia produtiva mais sustentável. Apesar dos desafios enfrentados na análise de grandes coleções de dados, existe um grande potencial para gerar valor para a cadeia da carne, e nesse sentido produtores, técnicos e a indústria precisam estar preparados para se beneficiarem da digitalização da pecuária e por meio desta agregarem valor ao negócio.

REFERÊNCIAS

AIKEN, V. C. F.; DÓREA, J. R. R.; ACEDO, J. S.; SOUSA, F. G.; DIAS, F. G.; ROSA, G. J. M. Record linkage for farm-level data analytics: comparison of deterministic, stochastic and machine learning methods. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *163*, p. 104857, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104857.

AIKEN, V. C. F.; FERNANDES, A. F. A.; PASSAFARO, T. L.; ACEDO, J. S.; DIAS, F. G.; DÓREA, J. R. R.; ROSA, G. J. D. M. Forecasting beef production and quality using large-scale integrated data from Brazil. **Journal of Animal Science**, v. *98*, n. 4, p. 89, 2020. DOI: http://doi.org/10.1093/jas/skaa089.

AMARAL, T. B.; GOMES, R. C.; ROSA, G. J. M. **Produção de novilho precoce no Estado de Mato Grosso do Sul**: análise exploratória de dados do Programa PROAPE-Precoce MS. Brasília: Embrapa, 2021. Comunicado Técnico, 162. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1138385/1/COT-162-Final-em-alta1.pdf. Acesso em: 30 dez. 2022.

BELLO, N. M.; FERREIRA, V. C.; GIANOLA, D.; ROSA, G. J. M. Conceptual framework for investigating causal effects from observational data in livestock. **Journal of Animal Science**, v. *96*, n. 10, p. 4045-4062, 2018. DOI: http://doi.org/10.1093/jas/sky277.

BENJAMIN, M.; YIK, S. Precision livestock farming in swine welfare: a review for swine practitioners. **Animals**, v. *9*, n. 4, p. 133, 2019. DOI: http://doi.org/10.3390/ani9040133.

BERCKMANS, D. General introduction to precision livestock farming. **Animal Frontiers**, v. *7*, n. 1, p. 6-11, 2017. DOI: http://doi.org/10.2527/af.2017.0102.

BOLFE, É. L.; JORGE, L. A. C.; SANCHES, I. D. A.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; COSTA, C. C.; VICTORIA, D. C.; INAMASU, R. Y.; GREGO, C. R.; FERREIRA, V. R.; RAMIREZ, A. R. Precision and digital agriculture: adoption of technologies and perception of Brazilian farmers. **Agriculture**, v. *10*, n. 12, p. 653, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/agriculture10120653.

COMINOTTE, A.; FERNANDES, A. F. A.; DOREA, J. R. R.; ROSA, G. J. M.; LADEIRA, M. M.; VAN CLEEF, E. H. C. B.; PEREIRA, G. L.; BALDASSINI, W. A.; MACHADO NETO, O. R. Automated computer vision system to predict body weight and average daily gain in beef cattle during growing and finishing phases. **Livestock Science**, v. *232*, p. 103904, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.103904.

DAMA INTERNATIONAL. **DAMA-DMBOK***: Data Management Body of Knowledge*. 2nd ed. Denville, NJ: Technics Publications, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Visão de futuro do Agro.** Brasilia: EMBRAPA, 2022. Disponível em: https://www.embrapa.br/en/visao-de-futuro. Acesso em: 30 dez. 2022.

FERNANDES, A. F. A.; DÓREA, J. R. R.; ROSA, G. J. M. Image analysis and computer vision applications in animal sciences: an overview. **Frontiers in Veterinary Science**, v. *7*, p. 551269, 2020. DOI: http://doi.org/10.3389/fvets.2020.551269.

FERREIRA, R. E. P.; BRESOLIN, T.; ROSA, G. J. M.; DÓREA, J. R. R. Using dorsal surface for individual identification of dairy calves through 3D deep learning algorithms. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *201*, p. 107272, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107272.

GOMES, R. C; NICACIO, A. C.; NOGUEIRA, É.; COSTA, F. P.; DIAS, F. R. T.; FEIJÓ, G. L. D.; MENEZES, G. R. O.; SILVA, J. C. B.; OLIVEIRA, L. O. F.; SILVA, L. O. C.; GOMES, M. N. B.; MEDEIROS, S. R.; ABREU, U. G. P. **Novilho precoce:** demandas e caminhos para sua produção e valorização. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2018. 48 p. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1102353/1/Novilhoprecocedemandasecaminhos.pdf. Acesso em: 20 dez. 2022.

HAJDARBEGOVIC, M. **Data lake architecture***: a comprehensive guide.* Austin: Virtasant, 2020. Disponível em: https://www.virtasant.com/blog/data-lake-architecture. Acesso em: 30 dez. 2022.

KAMIENSKI, C.; VISOLI, M.C. Swamp: uma plataforma para irrigação de precisão baseada na Internet das Coisas. **Fonte**, v. *15*, n. 20, p. 76-84, 2018. Disponível em: http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1105001. Acesso em: 23 nov. 2022.

KAMILARIS, A.; KARTAKOULLIS, A.; PRENAFETA-BOLDÚ, F. X. A review on the practice of big data analysis in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *143*, p. 23-37, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037.

LIAKOS, K. G.; BUSATO, P.; MOSHOU, D.; PEARSON, S.; BOCHTIS, D. Machine learning in agriculture: a review. **Sensors**, v. *18*, n. 8, p. 2674, 2018. DOI: http://doi.org/10.3390/s18082674.

MOROTA, G.; VENTURA, R. V.; SILVA, F. F.; KOYAMA, M.; FERNANDO, S. C. Machine learning and data mining advance predictive big data analysis in precision animal agriculture. **Journal of Animal Science**, v. *96*, n. 4, p. 1540-1550, 2018. DOI: http://doi.org/10.1093/jas/sky014.

PASSAFARO, T. L.; FERNANDES, A. F. A.; VALENTE, B. D.; WILLIAMS, N. H.; ROSA, G. J. M. Network analysis of swine movements in a multi-site pig production system in Iowa, USA. **Preventive Veterinary Medicine**, v. *174*, p. 104856, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2019.104856.

PASSAFARO, T. L.; VAN DE STROET, D.; BELLO, N. M.; WILLIAMS, N. H.; ROSA, G. J. Generalized additive mixed model on the analysis of total transport losses of market-weight pigs. **Journal of Animal Science**, v. *97*, n. 5, p. 2025-2034, 2019.

ROSA, G. J. M. Grand challenge in precision livestock farming. **Frontiers in Animal Science**, v. *2*, p. 650324, 2021. DOI: http://doi.org/10.3389/fanim.2021.650324.

ROSA, G. J. M.; VALENTE, B. D. Inferring causal effects from observational data in livestock. **Journal of Animal Science**, v. *91*, n. 2, p. 553-564, 2013. DOI: http://doi.org/10.2527/jas.2012-5840.

SPERANZA, E. A.; HIGA, R. H.; VISOLI, M. C.; MARTINS, C.; CARROMEU, C. Plataforma de internet das coisas para monitoramento de produtividade e bem-estar animal em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO (ConBAP), 2022, Campinas. **Anais** [...]. Campinas: Associação Brasileira de Agricultura de Precisão, 2022. p. 378-385.

WOOD, S. N.; LI, Z.; SHADDICK, G.; AUGUSTIN, N. H. Generalized additive models for Gigadata: modeling the U.K. black smoke network daily data. **Journal of the American Statistical Association**, v. *112*, n. 519, p. 1199-1210, 2017. DOI: http://doi.org/10.1080/01621459.2016.1195744.

Identificação eletrônica de animais por radiofrequência: trajetória para elaboração de normas brasileiras e internacionais

Radiofrequency identification of animals: trajectory for the development of Brazilian and international standards

Waldomiro Barioni Júnior[1], Washington Luiz de Barros Melo[2], Marcela de Mello Brandão Vinholis[3], Leoni Leite[4], Adriana da Hora Santos[5], Carlos Gustavo de Camargo Ferraz Machado[6], Fabiana Cunha Viana Leonelli[7], Ricardo Rosendo de Castro[8], Luiz Henrique Witzler[9], Paulo Estevão Cruvinel[10]

[1] *Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, waldomiro.barioni@embrapa.br*
[2] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, washington.melo@embrapa.br*
[3] *Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, marcela.vinholis@embrapa.br*
[4] *Gestor, ABNT/CB-203, São Paulo (SP), Brasil, cb-203@abnt.org.br*
[5] *Chefe de Secretaria, ABNT/CB-203, São Paulo (SP), Brasil, adriana.santos@abimaq.org.br*
[6] *Diretor/Fundador, Animalltag, São Carlos (SP), Brasil, c.machado@animalltag.com.br*
[7] *Professor, Universidade de São Paulo, Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Pirassununga (SP), Brasil, fabiana.leonelli@usp.br*
[8] *Diretor/Fundador, Scutum, Abaeté (MG), Brasil, ricardo.rosendo@gmail.com*
[9] *Diretor/Fundador, SBC, Botucatu (SP), Brasil, alemão@sbcert.com.br*
[10] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), paulo.cruvinel@embrapa.br*

RESUMO

A identificação eletrônica de animais por radiofrequência (RFID) é um dos métodos praticados de identificação individual de animais. Esse método de identificação eletrônica deve estar em conformidade com as normas nacional e internacionalmente reconhecidas, as quais estão relacionadas não apenas à eletrônica e aos protocolos de operação mas também aos dispositivos de implantação e escaneamento. Essa conformidade é estratégica para a indústria nacional e o comércio internacional de animais e produtos derivados. Este capítulo apresenta um histórico da criação e trabalhos realizados pela Comissão de Estudo de Identificação Eletrônica de Animais por Radiofrequência (CE-203:019.001), a qual está vinculada à Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). As funções desta CE são: (i) tradução interpretativa de normas técnicas para o contexto brasileiro oriundas de normas ISO (International Organization for Stardardization), referentes à identificação eletrônica de animais; (ii) inserções e correções de normas ISO apresentadas à ABNT para votação; e (iii) participação em reuniões da ISO relacionadas ao tema de "Identificação" relativa a "Agricultural electronics" presente no ISO/TC 23/SC19/WG3) com contribuições para o desenvolvimento das Normas Internacionais sobre o tema. As normas técnicas visam garantir a qualidade de um determinado produto ou serviço. Elas estabelecem padrões, regras ou critérios ótimos reconhecidos internacionalmente para a aceitação de produtos e serviços, visando proporcionar conforto, segurança, harmonia e qualidade.

Palavras-chave: rastreabilidade animal; identificação eletrônica; pecuária de precisão; agricultura de precisão; suporte à decisão; segurança.

ABSTRACT

Radiofrequency identification (RFID) is the preferred method of animal permanent individual identification. This method of electronic identification must comply with nationally and internationally recognized standards, which are related not only to the electronics and protocols for operation but also to implantation and scanning devices. This compliance is strategic for the national industry and the international trade of animals and derived

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000055

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

products. This chapter presents a history of the creation and studies carried out by the Committee for the Study of Electronic Identification of Animals by Radiofrequency (CE 203:019. 001), associated with the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). The functions of the CE are: (i) the interpretive translation of technical standards for the Brazilian context from ISO (International Organization for Standardization) standards concerning electronic identification of animals; (ii) insertions and corrections of ISO standards submitted to ABNT for voting, and; (iii) attendance in ISO meetings related to theme "Identification" under "Agricultural electronics" (at ISO/TC 23/SC19/WG3) with contributions to the development of International Standards. Technical standards aim to guarantee the quality of a particular product or service. They establish internationally recognized standards, rules, or optimal criteria for the acceptance of products and services, aiming to provide comfort, safety, harmony, and quality.

Keywords: animal traceability; electronic identification; precision livestock; precision agriculture; decision making; security.

1 INTRODUÇÃO

As ocorrências das contaminações de alimentos na década de 1990 evidenciaram a fragilidade dos sistemas de gerenciamento da qualidade e da segurança de alimentos, em especial a ineficiência dos sistemas de transmissão das informações entre os elos das cadeias de produção alimentícias. A adoção de práticas e procedimentos que derivam de sistemas de gestão da qualidade – como a rastreabilidade e a certificação – tornou-se cada vez mais relevante para a competitividade das cadeias produtivas, principalmente aquelas voltadas à exportação. Nesse contexto, a identificação animal é uma ferramenta imprescindível para o controle de enfermidades e certificação da qualidade dos produtos de origem animal, mostrando-se também importante na pesquisa em melhoramento genético, por meio da análise dos registros produtivos dos animais, segurança e gerenciamento em banco de dados. Ademais, diante de possíveis surtos epidêmicos decorrentes das deficiências nos sistemas tradicionais de produção animal, os países importadores passaram a ser mais rigorosos na fiscalização desses produtos, exigindo a identificação eletrônica individual dos animais por RFID.

Existem diversas definições para rastreabilidade. Uma definição amplamente utilizada é a estabelecida pela International Organization for Stardardization (ISO, por meio de sua norma ISO 9000:2000): "a capacidade de recuperação do histórico, da aplicação ou da localização de uma entidade, por meio de identificações registradas". A operacionalização da rastreabilidade depende do uso de dispositivos de identificação do produto. No caso de animais, uma das alternativas é o uso de dispositivos eletrônicos operando por radiofrequência (RFID). O uso de dispositivos eletrônicos tem as vantagens da unicidade do código de identificação, da aplicabilidade do produto, da facilitação de manejo dos animais, da manutenção, da transferência de informações do animal para plataformas, da formação de bases de dados eletrônicas para uso tanto na identificação quanto na rastreabilidade do animal, como também para a gestão e tomada de decisão mais precisa.

A Figura 1 mostra um dos tipos de dispositivo eletrônico de identificação animal (brinco auricular) em conformidade com as ABNT NBR 14766 e ABNT NBR 15006, baseadas nas ISO 11784 e ISO 11785 (Barioni Júnior et al., 2016). O brinco eletrônico é essencial para a coleta de dados individuais dos animais por meio de sensores. Esses dados podem ser armazenados e analisados em plataformas digitais para a rastreabilidade do animal e o gerenciamento do rebanho.

No mundo que se encontra cada vez mais conectado é essencial que os dispositivos eletrônicos de identificação animal sejam universais, customizados à finalidade, de fácil entendimento e para uso nos diferentes países. Para isso, é importante que a produção e o uso dos dispositivos eletrônicos sejam associados a uma certificação de conformidade e de desempenho de acordo com padrões internacionalmente aceitos.

Este capítulo tem por objetivo apresentar a trajetória, entidades e atores envolvidos na elaboração de normas aceitas para a identificação eletrônica de animais por radiofrequência (RFID) no mundo e no Brasil.

2 INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO)

O estabelecimento de Normas Internacionais pressupõe a existência de uma entidade de âmbito global, não governamental, independente e formada por representantes de diversos países, sejam eles entidades nacionais de normalização e/ou empresas interessadas no tema. Essa entidade é materializada na federação formada pelos organismos de normalização dos países, conhecida como International Organization for Standardization (ISO).

A ISO é a maior entidade mundial desenvolvedora de normas voluntárias. Para isso, ela conta com membros de mais de 160 países e mais de 3 mil órgãos técnicos

Figura 1. (a), (b), (c) aplicação do brinco eletrônico na orelha do animal, (d) brinco eletrônico, (e) partes separadas do brinco e identificação por código de barras, (f) leitora do brinco, (g) sistema de armazenamento e gerenciamento de dados.

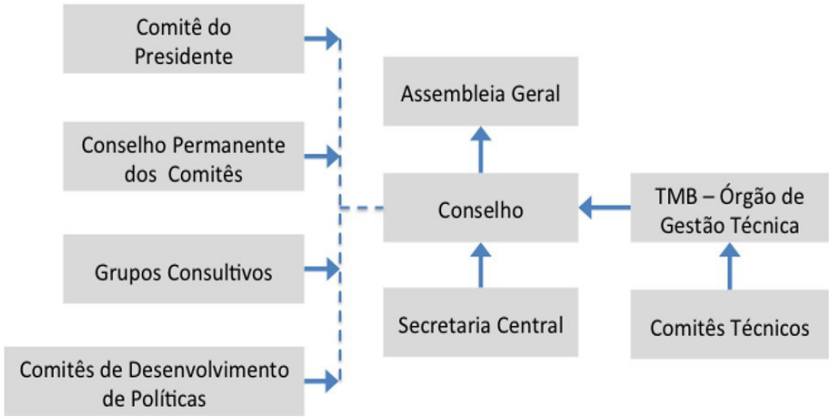


Figura 2. Estrutura de governança da ISO.

responsáveis pela elaboração de normas (International Organization for Standardization, 2022). Sua secretaria central está sediada em Genebra, na Suíça.

A Figura 2 apresenta a estrutura de governança da ISO, onde destacamos o Conselho da ISO, órgão central que recebe de seu Órgão de Gestão Técnica (Technical Management Board – TMB) orientações acerca dos trabalhos dos Comitês Técnicos da ISO. O TMB é responsável pela gestão geral dos Comitês Técnicos e composto por um seleto grupo de entidades normalizadoras, como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

3 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT)

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), fundada em 1940, com estatuto próprio, gerado também no mesmo ano, é a entidade responsável pela elaboração e publicação de normas técnicas no Brasil, reconhecida por meio da Resolução nº 07, do Conmetro, de 24.08.1992, como único Foro Nacional de Normalização (https://www.abnt.org.br/).

Entre os objetivos da ABNT, destacam-se:

- Elaborar normas técnicas e fomentar seu uso nos campos científico, técnico, industrial, comercial, agrícola, de serviços e outros correlatos, além de mantê-las atualizadas;
- Incentivar e promover a participação das partes interessadas da sociedade no processo de desenvolvimento de normas técnicas e na difusão da normalização do país;
- Representar o Brasil nas entidades internacionais de normalização técnica, especialmente na ISO e na IEC.

A ABNT é membro fundador da ISO, da Comissão Panamericana de Normas Técnicas (Copant) e da Associação Mercosul de Normalização (AMN). Cabe lembrar que as Normas Internacionais norteiam o comércio internacional e impactam o mercado nacional. Dessa forma, participa, por meio da ABNT, das entidades de normalização internacional como membro tendo a capacidade de contribuir com as votações na

ISO, possibilita trabalhar na elaboração de documentos técnicos e acompanhar o desenvolvimento tecnológico internacional. Esse protagonismo é muito positivo para a indústria brasileira.

3.1 A ABNT está estruturada da seguinte forma (Figura 3):

- *Comitês Brasileiros* (CB): que *são órgãos de coordenação, planejamento e execução das atividades de normalização técnica e responsáveis pela organização e elaboração de Normas Técnicas Brasileiras*.
- *Comissões de Estudo* (CE): têm *a finalidade de elaborar e revisar Normas Técnicas Brasileiras e outros documentos técnicos*.

As CE são constituídas voluntariamente por representantes de instituições e empresas interessadas como universidades, institutos, instituições governamentais, não governamentais e empresas produtoras e consumidoras (produtos e serviços), isto é, "*as partes interessadas na matéria objeto de normalização*". Adicionalmente, "*a Comissão de Estudo é, quanto ao conteúdo técnico da norma, autônoma, soberana e por ele responsável*" (Art. 37 do Estatuto).

- *Comissão de Estudo Especial* (CEE): *para tratar de temas não contemplados no âmbito de atuação dos Comitês Brasileiros* (Estatuto da ABNT, Cap. XII, Art. 34).

As normas brasileiras podem ter três origens: (i) geradas para o contexto nacional, isto é, normas próprias (ABNT NBR); (ii) baseadas em outras Normas Internacionais, porém adequadas ao contexto nacional (NBR); e (iii) traduzidas na íntegra a partir de uma norma internacional, por exemplo, ISO, tornando-se uma ABNT NBR ISO.

3.2 COMITÊ BRASILEIRO DE TRATORES, MÁQUINAS AGRÍCOLAS E FLORESTAIS (ABNT/CB-203)

Até o ano de 2012, o Comitê Brasileiro de Máquinas e Equipamentos Mecânicos (ABNT/CB-004) coordenava um conjunto de CE que englobava, entre outros assuntos, o tratamento de tratores e máquinas agrícolas. Em 2013, foi criado um Comitê Brasileiro, devido à necessidade de se manter em um mesmo Comitê Técnico os assuntos relacionados à normalização de tratores, máquinas, sistemas, acessórios e equipamentos utilizados na agricultura e silvicultura, bem como jardinagem, paisagismo, irrigação e outras áreas correlatas que utilizam esses equipamentos, incluindo aspectos de eletroeletrônica e identificação eletrônica de todas as categorias de animais. Com isso, quatro Comissões de Estudo do ABNT/CB-004 e do Comitê Brasileiro Automotivo (ABNT/CB-005) foram transferidas para o novo comitê, denominado Comitê Brasileiro de Tratores, Máquinas Agrícolas e Florestais (ABNT/CB-203), que se tornou um espelho do ISO/TC 23. Assim, a CE-004:015.14 passou a receber a nomenclatura CE-203:019.001.

A atividade de normalização na ISO voltada para tratores, máquinas agrícolas e florestais é organizada pelo ISO/TC 23, Tractors and machinery for agriculture and forestry. Esse ISO/TC 23 tem 394 normas publicadas e conta com a participação de mais de 60 países, entre participantes ativos (membros P), como o Brasil, e observadores (membros O). Para o setor de máquinas e implementos agrícolas e florestais, o desenvolvimento de normas técnicas pode representar produtos mais inovadores, seguros, de qualidade superior e com melhores informações aos consumidores. As normas desse setor têm por objetivo prover a indústria, a academia, as instituições de pesquisa e a sociedade brasileira com normas atualizadas e padrões reconhecidos internacionalmente que resultem em produtos seguros e de qualidade, que atendam aos requisitos brasileiros, garantindo a inserção no mercado global.

O ABNT/CB-203 é estruturado em 12 CE, especializadas por tipo de produto ou área de concentração. Entre elas destaca-se a Comissão de Estudo de Identificação Eletrônica de Animais por Radiofrequência (CE-203:019.001), responsável pela normalização no

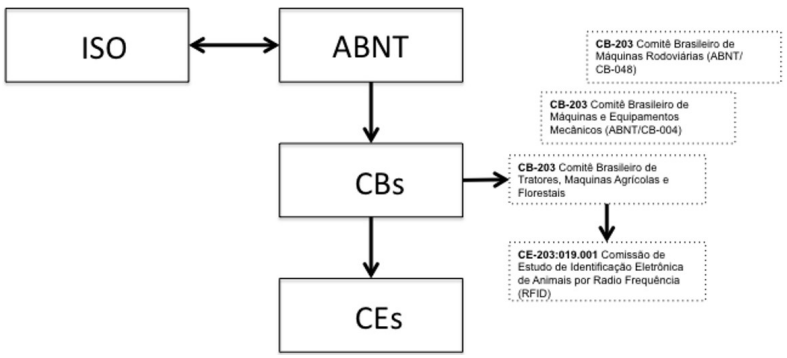


Figura 3. Estrutura da ABNT e sua relação com a ISO.

campo de dispositivos eletrônicos para identificação de animais (espelho do ISO/TC 23/SC 19/WG3).

A Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (Abimaq/São Paulo/SP) é responsável pelas atividades da secretaria, provendo suporte administrativo aos subcomitês e às Comissões de Estudo nas áreas de normalização, informática e regulamentação.

3.2.1 COMISSÃO DE ESTUDO DE IDENTIFICAÇÃO ELETRÔNICA DE ANIMAIS POR RADIOFREQUÊNCIA (CE 203:019.001)

Formação da CE-203:019.001 - Em 1999, após a caracterização de demandas do setor produtivo sobre identificação de animais para a pecuária de corte e leiteira, motivaram a busca pela parceria entre Embrapa e ABNT para a criação da Comissão de Estudo de Identificação Eletrônica de Animais por Radiofrequência (ABNT/CE-004:015.14).

A ABNT/CE-203:019.001, como espelho do ISO/TC 23/SC19/WG3, atua: (i) na tradução interpretativa de normas técnicas para o contexto brasileiro, das Normas ISO referentes à identificação eletrônica de animais; (ii) nas inserções e correções de Normas ISO apresentadas à ABNT para votação; (iii) na participação em reuniões do Comitê ISO/TC 23/SC19/WG3), para o desenvolvimento das Normas Internacionais sobre o tema. Destaca-se a participação de membro desta Comissão de Estudo, respaldado pelas demais partes interessadas, como autor principal da ISO 6881 (*International Numbering for official animal identification schemes*); e (iv) em outras demandas específicas.

- **Composição da CE-203:019.001 -** A Comissão de Estudo é composta por partes interessadas dos setores produtivos, acadêmico, técnico e consumidores. Os indivíduos que representam esses setores podem variar ao longo do tempo, mas o assento do segmento do setor se mantém. Atualmente, participam das reuniões da CE-203:019.001 representantes da indústria (como produtores de equipamentos para identificação eletrônica de animais), da pesquisa e academia (como Embrapa e Universidade de São Paulo), bem como consumidores (pecuaristas, certificadores etc.).
- **Trabalhos desenvolvidos e contribuições da CE-203:019.001 -** Durante os anos de sua existência, a CE elaborou diversas Normas Brasileiras. A ABNT NBR é uma norma genuinamente brasileira ou baseada em outra norma de âmbito internacional, com modificações, de forma a atender às necessidades brasileiras. Já a ABNT NBR ISO é uma norma idêntica a uma Norma ISO, traduzida e interpretada de forma a atender às condições de interesse nacional. Uma ABNT NBR ISO é a adoção da tradução na íntegra de uma Norma ISO.

Ainda na época da CE-004:015.14 (**Comissão de Estudo de Identificação Eletrônica de Animais por Radiofrequência**), foram publicadas as ABNT NBR 14766 Identificação de animais por radiofrequência – Estrutura do código, e a ABNT NBR 15006 – Identificação de animais por radiofrequência – Conceitos técnicos, que são baseadas nas ISO 11784 e ISO 11785.

A ABNT NBR 14766 trata da identificação eletrônica de animais por radiofrequência (RF) e estabelece a estrutura do código de identificação. Esse código é um número binário de 64 bits, em que cada bit tem um significado. Assim, pode-se dizer que esse código é o número digital da identidade (RG) do animal. Cada animal tem um RG digital. Por exemplo, em uma série de 15 dígitos (**076** 0800 09876784), os três primeiros dígitos especificam o nº do país. O nº oficial do Brasil é o "**076**" (ISO 3166 e Instrução Normativa nº 05, de 8 de janeiro de 2018 – Mapa).

Esses bits são armazenados no circuito eletrônico do ***transponder*** (dispositivo que transmite as informações armazenadas, quando ativado por um ***transceptor,*** que é um leitor do sinal de RF), que eventualmente seja capaz de armazenar novas informações. O conjunto de seus códigos de identificação não pode ser alterado posteriormente.

A ABNT NBR 15006 trata dos conceitos técnicos de transmissão e recepção dos sinais de RF para a comunicação entre o *transponder* e o *transceptor*. Nela estão especificados o formato das ondas eletromagnéticas e as suas frequências, para ser realizada a transferência do código de identificação, além de outras funções.

A ABNT NBR 15006 foi revisada pela CE-203:019.001, bem como outras normas foram elaboradas, derivadas das ABNT NBR 14766 e ABNT NBR 15006. Estas normas detalham como armazenar mais informações sobre o animal em seu próprio *chip*, as diferentes maneiras de comunicação e onde o *transponder* deve ser implantado no animal, testes de conformidades, desempenho e responsividade (série ISO 14223).

O fato de as Normas Brasileiras estarem alinhadas às Normas Internacionais facilita e dá credibilidade à comercialização de produtos nacionais em mercados estrangeiros, ampliando a inserção nesses mercados, e os tornando mais receptivos aos produtos brasileiros.

A seguir é apresentada a lista das normas traduzidas e interpretadas pela CE e posteriormente publicadas pela ABNT:

- ABNT NBR 14766:2002 - Identificação de animais por radiofrequência – Estrutura do código (revisada em 2019)

- ABNT NBR 14766:2019 - Identificação de animais por radiofrequência – Estrutura do código
- ABNT NBR 15006:2003 - Identificação de animais por radiofrequência – Conceitos técnicos (Norma substituída pela edição de 2016)
- ABNT NBR 15006:2016 - Identificação de animais por radiofrequência – Conceitos técnicos
- ABNT NBR ISO 14223-1:2015 - Identificação de animais por radiofrequência – Parte 1: *Transponders* avançados – Interface aérea
- ABNT NBR ISO 14223-2:2016 - Identificação de animais por radiofrequência – Parte 2: *Transponders* avançados – Código e estrutura de comando
- ABNT NBR ISO 14223-3:2020 - Identificação de animais por radiofrequência – Parte 3: *Transponders* avançados – Aplicações
- ABNT NBR ISO 24631-1:2018 - Identificação de animais por radiofrequência – Parte 1: Avaliação da conformidade de *transponders* RFID (identificação por radiofrequência) com as ISO 11784 e ISO 11785 (incluindo concessão e uso de um código do fabricante)
- ABNT NBR ISO 24631-2:2023 - Identificação de animais por radiofrequência – Parte 2: Avaliação da conformidade de transceptores RFID (identificação por radiofrequência) com as ISO 11784 e ISO 11785
- ABNT NBR ISO 24631-3:2021 - Identificação de animais por radiofrequência — Parte 3: Avaliação de desempenho de *transponders* RFID (identificação por radiofrequência) de acordo com as ISO 11784 e ISO 11785
- ABNT NBR ISO 24631-4:2022 - Identificação de animais por radiofrequência - Parte 4: Avaliação de desempenho de *transceptores* RFID (identificação por radiofrequência) de acordo com as ISO 11784 e ISO 11785 (em preparação pela CE-203:019.001)
- ABNT NBR ISO 24631-5:2023 - Identificação de animais por radiofrequência - Parte 5: Procedimento para ensaiar a competência dos *transceptores* RFID de ler *transponders* ISO 11784 e ISO 11785
- ABNT NBR ISO 24631-6:2024 - Identificação de animais por radiofrequência – Parte 6: Representação de informações de identificação de animais (exibição visual/transferência de dados)

A tradução interpretativa de Normas ISO é uma das funções da CE, além da análise e votação de textos (*drafts*) de futuras normas ISO. Para isso, a ISO encaminha à ABNT os textos e solicitações de análise e votação. A Diretoria de Normalização da ABNT, por meio de sua área internacional, encaminha a demanda ao coordenador da CE, que, por sua vez, repassa aos membros para análise conjunta e votação. As sugestões de correções, modificações e melhorias dos textos ISO são enviadas ao ISO/TC 23/SC 19.

Votações de Normas ISO realizadas pela CE, emitindo parecer, em atendimento à ABNT:

- ISO 11784: Radiofrequency identification of animals – Code structure
- ISO 11785: Radiofrequency identification of animals – Code structure
- ISO 14223-1: Radiofrequency identification of animals – Advanced transponders – Part 1: Air interface
- ISO 14223-2: Radiofrequency identification of animals – Advanced transponders – Part 2: Code and command structure
- ISO 14223-3: Radiofrequency identification of animals – Advanced transponders – Part 3 - Applications
- ISO 15639-1: Radio frequency identification of animals – Standardization of injection sites for different animal species – Part 1: Companion animals (cats and dogs)
- ISO 15639-2 Radio frequency identification of animals – Standardization of injection sites for different animal species – Part 2: Equine (horses, donkeys and zebras)
- ISO 24631-1: Radio frequency identification of animals – Part 1: Evaluation of conformance of RFID transponders with ISO 11784 and ISO 11785 (including granting and use of a manufacturer code)
- ISO 24631-2: Radio frequency identification of animals – Part 2: Evaluation of conformance of RFID transceivers with ISO 11784 and ISO 11785
- ISO 24631-3: Radio frequency identification of animals – Part 3: Evaluation of performance of RFID transponders conforming with ISO 11784 and ISO 11785
- ISO 24631-4: Radio frequency identification of animals – Part 4: Evaluation of performance of RFID transceivers conforming with ISO 11784 and ISO 11785
- ISO 24631-5: Radio frequency identification of animals – Part 5: Procedure for testing the capability of RFID transceivers of reading ISO 11784 and ISO 11785 transponders
- ISO 24631-6: Radiofrequency identification of animals – Part 6: Representation of animal identification information (visual display/data transfer)
- ISO 6881: Radio-frequency identification of animals – Code Structure Ultra High Frequency transponders

Outras funções da CE envolvem a participação de seus membros em reuniões internacionais do ISO/TC 23/SC19, contribuindo ativamente na elaboração das Normas ISO. A elaboração de documentos internacionais ocorre por meio da participação de membros em Grupos de Trabalho (*Working Groups* – WG) sobre temas específicos. Os membros participam e contribuem como peritos em suas áreas de conhecimento. Nesta atividade, destaca-se a participação re-

cente de um membro da CE em WG 3 *(Identification)* na elaboração da ISO 6881.

Adicionalmente à elaboração de Normas Brasileiras, a CE atendeu à solicitação da Coordenação do Sistema Brasileiro de Identificação Individual de Bovinos e Búfalos (SISBOV) do Mapa e apoiou a elaboração da **Instrução Normativa nº 51, de 1 de outubro de 2018**, que institui o Sisbov, referente ao processo de rastreabilidade animal no território nacional. Já a **Instrução Normativa nº 05, de 8 de janeiro de 2018, do Mapa,** baseia-se nas ABNT NBR 14766 e ABNT NBR 15006 e reconhece o Mapa como entidade reguladora do banco de dados nacional, conforme preconiza a ABNT NBR 14766. Vale destacar que a implementação e a aplicação de normas técnicas são voluntárias, podendo somente entidades legisladoras tornar essas normas obrigatórias.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Em várias partes do mundo, pequenos e grandes animais têm sido identificados e monitorados com dispositivos de identificação por radiofrequência (RFID). Esses *transponders* podem ser lidos com leitores portáteis e leitores fixos ou estacionários. A leitura pode ser realizada tanto em ambiente rural como urbano, podendo ocorrer durante o transporte, no pátio de vendas, em residências ou, ainda, no abatedouro.
- A elaboração de normas assume papel fundamental para a melhoria da qualidade de produtos e serviços. As normas qualificam produtos, sendo documentos balizadores de processos que envolvem robustez, segurança e qualidade.
- Nesse contexto, a estruturação de uma Comissão de Estudo voltada à identificação de animais por radiofrequência no Brasil assume papel estratégico, quer seja para a elaboração de Normas Brasileiras, que são aprovadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Dessa forma as normas são organizadas com o intuito de apresentar soluções para problemas existentes por meio de conteúdos técnicos que agreguem qualidade, segurança e valor aos consumidores.

5 CONCLUSÕES

Os trabalhos de debates e avaliação de Normas ISO para adoção como Norma Brasileira visam garantir a qualidade da identificação eletrônica de animais por radiofrequência. Estabelecendo padrões, regras ou critérios ótimos reconhecidos internacionalmente para a adequação e padronização dos produtos e serviços. São de extrema importância para a indústria brasileira, proporcionando qualidade, conforto, segurança e adequação ambiental.

Neste trabalho, são reconhecidas as importantes contribuições, incentivos e dedicação do Dr. Alain Charles Edouard Moreau (In memoriam) nas atividades desenvolvidas pela Comissão de Estudo de Identificação Eletrônica de Animais por Rádio Frequência (CE-203:019.001), tanto no âmbito nacional como internacional.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Embrapa, Abimaq e ABNT**,** e aos diversos colaboradores pelos trabalhos desta CE ao logo de sua existência.

REFERÊNCIAS

BARIONI JÚNIOR, W.; MACHADO, C. G. C. F.; GARCIA, A. R.; ESTEVES, S. N.; PARANHOS, N. E. Avaliação da performance de identificador eletrônico por radiofrequência para bovinos de corte, produzido no Brasil. In: CONGRESSO DE ZOOTECNIA DE PRECISÃO, 1., 2016, Florianópolis. **Anais** [...]. São Paulo: Instituto Oswaldo Gessulli, 2016. v. 1, p. 1-5.</conf>l

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2022. Disponível em: https://www.iso.org/home.html. Acesso em: 26 set. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11784:1991:** Radio frequency identification of animals – Code structure. Genebra: ISO, 1991.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11784:1996/Amd 1:2004:** Radio frequency identification of animals – Code structure. Genebra: ISO, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11784:1996/Amd 2:2010:** Radio frequency identification of animals – Code structure — Indication of an advanced transponder. Genebra: ISO, 2010a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11784:1996:** Radio frequency identification of animals – Code structure. Genebra: ISO, 1996a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11785:1996:** Radio frequency identification of animals – Technical concept. Genebra: ISO, 1996b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14223-1:2003:** Radio frequency identification of animals - Advanced transponders - Part 1: Air interface. Genebra: ISO, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14223-2:2010:** Radio frequency identification of animals - Advanced transponders - Part 2: Code and command structure. Genebra: ISO, 2010b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14223-3:2018:** Radio frequency identification of animals - Advanced transponders - Part 3: Applications. Genebra: ISO, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 15639-1:2015:** Radio frequency identification of animals - Standardization of injection sites for different animal species - Part 1: Companion animals (cats and dogs). Genebra: ISO, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 24631-1:2017:** Radiofrequency identification of animals — Part 1: Evaluation of conformance of RFID transponders with ISO 11784 and ISO 11785 (including granting and use of a manufacturer code). Genebra: ISO, 2017a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 24631-2:2017:** Radiofrequency identification of animals — Part 2: Evaluation of conformance of RFID transceivers with ISO 11784 and ISO 11785 (including granting and use of a manufacturer code). Genebra: ISO, 2017b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 24631-3:2017:** Radiofrequency identification of animals — Part 3: Evaluation of performance of RFID transponders with ISO 11784 and ISO 11785 (including granting and use of a manufacturer code). Genebra: ISO, 2017c.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3166:** Codes for the representation of names of countries. Genebra: ISO, 1974.

Experiência da Embrapa Pecuária Sudeste na identificação eletrônica de animais por rádio frequência

Experience of Embrapa Pecuária Sudeste in animal electronic identification by radio frequency

Waldomiro Barioni Júnior[1], Carlos Gustavo de Camargo Ferraz Machado[2], Nacir Paranhos[3], Hélio de Sena G. Omote[4], Edilson da Silva Guimarães[5], Alberto Carlos de Campos Bernardi[6], Marcela de Mello Brandão Vinholis[7], Felipe Tonato[8]

[1] *Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, waldomiro.barioni@embrapa.br*
[2] *Diretor, Animalltag, São Carlos (SP), Brasil, c.machado@animalltag.com.br*
[3] *Supervisor, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, nacirparanhos@hotmail.com*
[4] *Analista, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, helio.omote@embrapa.br*
[5] *Supervisor, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, edilson.guimaraes@embrapa.br*
[6] *Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alberto.bernardi@embrapa.br*
[7] *Pesquisadora, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, marcela.vinholis@embrapa.br*
[8] *Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, felipe.tonato@embrapa.br*

RESUMO

A identificação individual de animais é o principal pilar no processo de gerenciamento e rastreabilidade do rebanho e também para a aplicação das tecnologias de pecuária de precisão. Por meio dela vinculam-se todas as ocorrências durante a vida do animal, do nascimento ao abate. As pesquisas desenvolvidas na Embrapa Pecuária Sudeste com animais necessitam de dados coletados individualmente. Nessa operação, todos os animais recebem um número de identificação no nascimento. Esse número fica vinculado ao animal até o seu abate ou venda, contribuindo para os programas de melhoramento genético de animais, manejo, manutenção do rebanho, índices zootécnicos e sanitários e, principalmente, garantindo a rastreabilidade em todo ciclo produtivo do animal. A identificação individual de cada animal no rebanho é essencial para assegurar a confiabilidade dos dados coletados em experimentos de pesquisa científica. O objetivo principal deste capítulo é apresentar um relato da identificação dos animais utilizada na Embrapa Pecuária Sudeste de 1975 até 2023. O relato mostra a experiência adquirida na identificação eletrônica de animais por rádio frequência (RFID) através de um sistema eletrônico de identificação e rastreabilidade bovina desenvolvido, testado e validado na unidade, por meio de parceria público-privada, via projeto de pesquisa. Esse caso de relação público-privada é um exemplo de sucesso e de amadurecimento da parceria e geração de resultados no avanço tecnológico para o setor produtivo e de retorno financeiro para os parceiros envolvidos.

Palavras-chave: identificação animal; rastreabilidade; pecuária de precisão; identificação eletrônica; bovino de corte.

ABSTRACT

The individual identification of animals is the main pillar in the herd's management and traceability process and for applying Precision Livestock technologies. It links all occurrences during the animal's life, from birth to slaughter. Research carried out at Embrapa Pecuária Sudeste with animals requires data to be collected individually. In this operation, all animals receive an identification number at birth. This number is linked to the animal until it is slaughtered or sold, contributing to programs for the genetic improvement of animals, management, herd maintenance, zootechnical and health indices, and, above all, to ensure traceability throughout the animal's production cycle. Furthermore, individual identification of each animal in the herd is essential to ensure the reliability of data collected from scientific research experiments carried out periodically at the unit. The main objective of this chapter is to present a report on the animal identification carried out at Embrapa Pecuária Sudeste from 1975 to 2023. The report shows the experience acquired with the Electronic Identification of Animals by

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000065

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

Radio Frequency (RFID) through an Electronic Bovine Identification and Traceability system developed, tested, and validated at the unit, through a public-private partnership, via a research project. This public-private relationship case is a successful example of partnership maturing and generating results in technological advances for the production sector and financial return for the partners involved.

Keywords: traceability; animal identification; precision livestock farming; electronic identification; beef cattle.

1 INTRODUÇÃO

A pecuária de precisão (PP) tem como foco a potencialização do desempenho individual dos animais em função do tratamento por grupos de manejo (Wathes et al., 2008; Berckmans, 2017). Isso somente é possível com um eficiente sistema de identificação individual e automação dos processos, que incluem nos sistemas o controle ambiental, fisiológico e comportamental (Edan et al., 2009; Berckmans, 2017). Dessa forma, a identificação animal passa a ser a base do processo da PP.

As pesquisas desenvolvidas na Embrapa Pecuária Sudeste com animais necessitam de dados coletados individualmente. Nessa operação, cada um dos animais recebe um número de identificação no nascimento. Esse número fica vinculado ao animal até o seu descarte (morte ou comercialização), contribuindo para os programas de melhoramento animal, de manejo, de manutenção do rebanho, dos índices zootécnicos e sanitários e, principalmente para garantir a rastreabilidade em todo o ciclo produtivo do animal. A identificação individual de cada animal no rebanho é essencial para assegurar também a confiabilidade dos dados coletados de experimentos de pesquisa científica realizados periodicamente na unidade.

A identificação individual de animais é o principal pilar no processo de gerenciamento e rastreabilidade do rebanho. Por meio dela vinculam-se todas as ocorrências durante a vida do animal, do nascimento ao abate ((Barioni Junior et al., 2016; Tomes et al., 2009).

A identificação bovina não eletrônica é dividida basicamente em quatro tipos: marcação a ferro com fogo ou nitrogênio; tatuagem; aplicação de brinco de plástico auricular visual e aplicação de botão auricular. Essas técnicas de identificação apresentam uma ou mais desvantagens, como ser dolorosas, alterar a estética do animal, provocar lesões na pele e desvalorizar o couro (Jacinto et al., 2009).

Existem várias alternativas de identificadores animais que são utilizados tanto na pesquisa como comercialmente (Schleppe et al., 2010; Trotter, 2010). Os sistemas de identificação por radiofrequência (RFID) têm sido usados com sucesso em sistemas de produção pecuários. As frequências dos sinais RFID mais comumente utilizadas são baixa frequência (LF, entre 125 kHz e 134,2 kHz), podendo ainda ser utilizadas a alta frequência (HF, 13,56 MHz) e a ultra-alta frequência (UHF, 865-868 MHz a 902-928 MHz) (Brown-Brandl et al., 2019).

O objetivo principal deste capítulo é apresentar um relato da identificação dos animais utilizada na Embrapa Pecuária Sudeste de 1975 até 2023. O relato mostra a experiência adquirida na identificação eletrônica de animais por rádio frequência (RFID) por meio de um sistema eletrônico de identificação e rastreabilidade bovina desenvolvido por parceria público-privada.

2 LINHA DO TEMPO NO PROCESSO DA INTERNALIZAÇÃO DA RFID NA EMBRAPA PECUÁRIA SUDESTE

De 1975 até 2011, todos os animais da Fazenda Canchim usados na pesquisa foram identificados individualmente com identificação numerada do bezerro recém-nascido através de tatuagem na face interna do pavilhão auricular (orelha direita) e brinco visual numerado (orelha esquerda). Essa prática de identificação adotada para o controle interno das atividades de manejo e pesquisa era posteriormente vinculada a um número de patrimônio da Embrapa. Tudo era lançado manualmente em um "livro de registro", sendo os dados repassados, em papel, ao setor de registro genealógico animal (RGR), onde se verificava a paternidade do recém-nascido. Exemplo de dados coletados no curral, na década de 80, e transferidos para uma papeleta: *Uma vaca no campo, prenha, devidamente identificada com tatuagem e brinco visual, pariu um bezerro – os dois foram levados até o curral onde foi realizada a coleta de dados (número da mãe, peso da mãe, escore corporal, data do parto, sexo do bezerro, cor do bezerro, peso do bezerro); condição do parto da mãe (normal, distócico e outras avaliações pós-parto); e a condição do nascimento do bezerro (nativivo ou natimorto)*[1]. Ainda nessa secção serão descritos os procedimentos detalhados de registro e identificação de bezer-

[1] Nacir Paranhos, comunicação pessoal.

ros das raças Canchim e Nelore nascidos na Embrapa Pecuária Sudeste bem como as identificações praticadas e exigidas pelas respectivas Associações de Criadores de Animais.

A identificação dos animais através de tatuagem (Figura 1b) era realizada por um alicate tatuador com agulhas compondo números e letras (Figura 1a). O brinco visual, de material plástico, era recebido limpo e o número do animal era escrito, manualmente, no brinco, com caneta especial (Figura 1c). Com o passar do tempo, a numeração passou a ser gravada por uma máquina que queimava/fundia o plástico com a série de números desejados (Figura 1d).

Mais tarde, os brincos visuais passaram a ser adquiridos já numerados diretamente dos fabricantes, com a sequência numérica respectiva já gravada previamente. Por exemplo, na compra era possível definir o tamanho desejado do brinco visual (grande ou extragrande), a cor do brinco (amarelo, azul, vermelho, verde etc.) e a série de números solicitados.

Com a chegada dos computadores na Embrapa, os dados de campo passaram a ser armazenados eletronicamente em planilhas eletrônicas, porém mantendo as coletas com papel e caneta e replicando os lançamentos em livro de registro. Na década de 90, os dados de campo eram coletados em papel e registrados em banco de dados DBASE III, na década de 2000, passaram a ser registrados no banco de dados Microsoft Access e manipulados por um sistema desenvolvido em DELPHI. De 2010 até os dias de hoje (2024), passaram a ser coletados através de dispositivos móveis tablets, enviados *online* para o armazenamento no banco de dados Postgres e atualizados/acessados via interface Java-WEB, propiciando acesso de qualquer local com sinal de internet. Tal sistema é denominado "Gecampe/REBANHO", concentrando todos os dados coletados, biometrias, marcas, símbolos que os animais recebem do nascimento até a sua baixa.

A partir de 2003 surgiram na unidade os primeiros trabalhos de testes com a identificação eletrônica de animais por rádio frequência (RFID). Nessa época, a União Europeia implementou suas diretrizes de rastreabilidade para carne bovina (EUREPGAP) como resposta à ocorrência de casos de encefalopatia espongiforme bovina (ECB ou Mal da Vaca Louca) na década de 90, no Reino Unido, e passou a exigir que países exportadores implementassem um sistema eficiente de rastreabilidade para garantir a qualidade da carne em seus aspectos sanitários. Outro ponto fundamental que impulsionou o uso de identificação individual no Brasil foi a implantação do Sistema Brasileiro de Identificação Individual de Bovinos e Búfalos – Sisbov (Brasil, 2006) do Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa). Entretanto, as deficiências apresentadas pelos identificadores visuais impulsionaram a adoção de brincos eletrônicos no manejo dos animais, uma vez que a ausência de erros de leitura da identificação garante a coleta de dados com a confiabilidade necessária para o sistema de rastreabilidade. O Sisbov adotou normas internacionais para padronizar a identificação de bovinos por radiofrequência. A medida favoreceu as exportações de carne bovina para mercados que, a exemplo da União Europeia, exigem a rastreabilidade e facilitou a gestão de rebanhos em propriedades rurais brasileiras.

Entre 2006 e 2011, a Embrapa Pecuária Sudeste, em parceria com a Empresa AnimallTAG, desenvolveu o projeto Desenvolvimento, validação e utilização de dispositivos eletrônicos – transponders em bovinos para fiscalização de sanidade animal e rastreabilidade.

Em 2011, com os resultados positivos do projeto, a Embrapa Pecuária Sudeste implantou a identificação eletrônica por rádio frequência em todos os animais da Fazenda Canchim (bovinos corte, bovinos leite e ovinos), num total de 1.391 animais, que receberam um brinco eletrônico tipo botão na orelha esquerda e brinco visual na direita (Figura 3) – as demais identificações praticadas na unidade seguiram normalmente. Os equinos, animais para lida, receberam microchip subcutâneo implantável (RFID) com aplicação na tábula do pescoço. Na Figura 2 tem-se a aplicação do brinco tipo botão, o cadastramento do

Figura 1. Formas de identificação animal na Embrapa Pecuária Sudeste.

Figura 2. Aplicação do brinco eletrônico e visual, cadastramento e manejo de rotina.

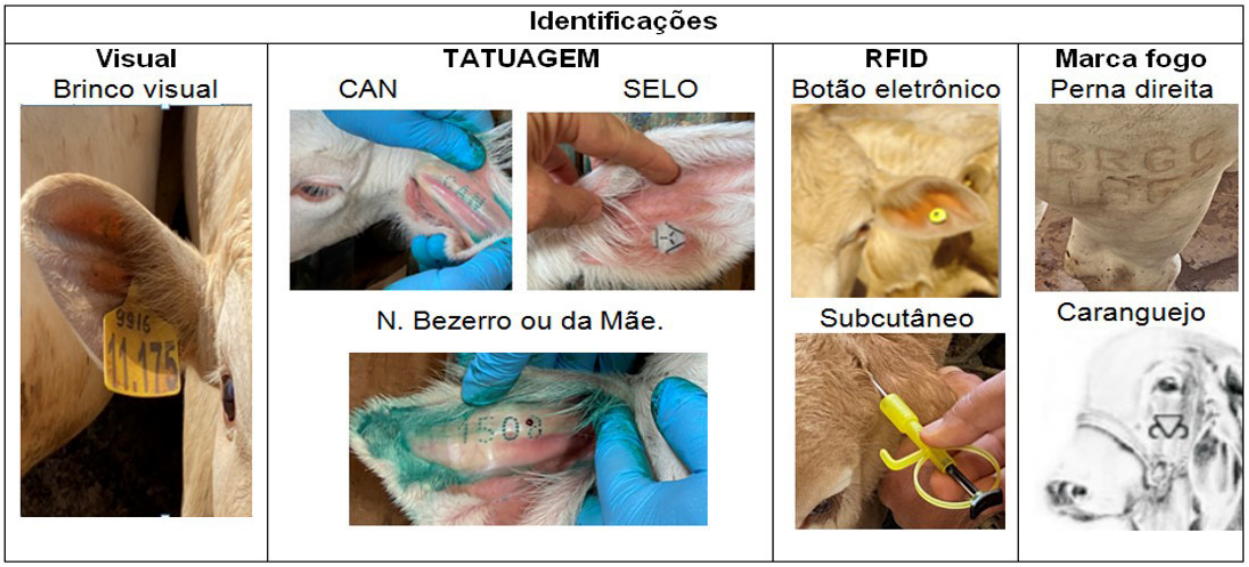


Figura 3. Os tipos de identificação praticados na Embrapa Pecuária Sudeste para bovinos de corte das raças Canchim e Nelore.

animal utilizando a tabela do peão com o uso do bastão/leitor para execução e registro das atividades de rotina no curral.

Mesmo com a adoção da identificação eletrônica por rádio frequência e todas as novas tecnologias de identificação animal implantadas na unidade, a identificação por tatuagem e marca de fogo ainda continuam sendo práticas usadas até os dias de hoje. A tatuagem é uma identificação padrão e obrigatória na Embrapa Pecuária Sudeste. A marca de fogo é uma exigência das associações de criadores de animais (Nelore e Canchim).

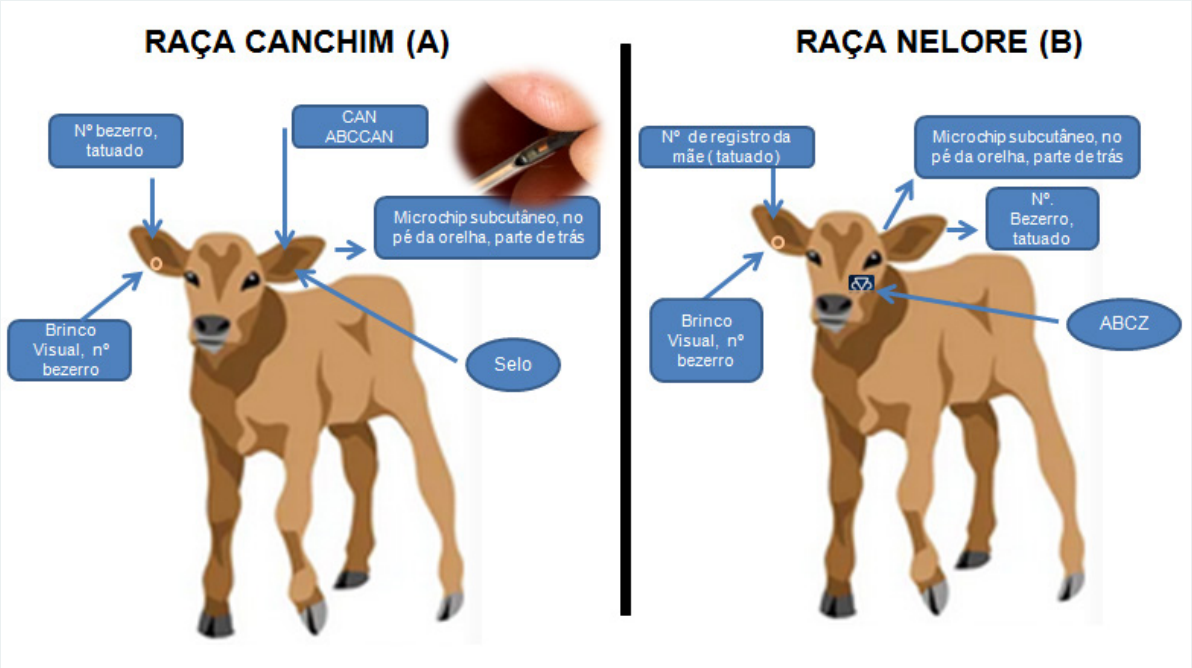
Atualmente a prática de identificação e registro de animais nascidos na Embrapa Pecuária Sudeste para o bovino de leite é um brinco visual (orelha direita), um botão eletrônico (orelha esquerda) e um microchip subcutâneo implantável aplicado na parte de trás do úbere. Para os ovinos aplica-se microchip subcutâneo implantável (na parte de trás da orelha esquerda). O Quadro 1 descreve a coleta de dados e identificação dos bovinos de corte nascidos na Embrapa Pecuária Sudeste das raças Canchim e Nelore.

No nascimento, todos os animais recebem a primeira dose de vermífugo, têm o umbigo curado e recebem uma dose de preventivo de diarreia (probiótico para ruminantes).

Devido ao maior índice de perdas de brincos eletrônicos tipo botão, a unidade optou por usar em todos os animais da Fazenda Canchim um microchip subcutâneo implantável (aplicado "no pé da orelha esquerda, parte de trás"), sendo o botão eletrônico usado somente em caso de experimentos que exigem integração com outro(s) dispositivo(s) eletrônico(s) para a coleta automática de dados, uma vez que o microchip subcutâneo possui pequena distância de leitura, não possibilitando essa integração. Ressalta-se que todas as identifi-

Quadro 1. Registro, coleta de dados e identificação dos bovinos de corte nascidos na Embrapa Pecuária Sudeste das raças Canchim e Nelore.

Dados do Canchim no nascimento (A): data nascimento, peso, sexo, cor do pelo e da mucosa. **Identificação do bezerro**: na orelha direita é tatuado o número do bezerro e colocado um brinco visual com o número do bezerro. No pé da orelha esquerda, na parte traseira, é aplicado um microchip subcutâneo implantável; no interior da orelha esquerda é tatuada a marca do "**CAN**", símbolo da Associação Brasileira de Criadores de Canchim (ABCCAN) e, no sobreano, caso o animal, macho ou fêmea, seja classificado por técnico habilitado da associação, ele recebe também o selo da ABCCAN. **Avaliação da mãe**: peso, escore corporal e outras avaliações pós-parto.
Dados do Nelore no nascimento (B): data nascimento, peso, sexo e cor. **Identificação do bezerro**: na orelha esquerda é tatuado no número do bezerro e no pé da orelha esquerda, na parte traseira, é aplicado um microchip subcutâneo implantável. Na orelha direita é tatuado o número de registro da mãe e colocado um brinco visual com o número do bezerro. No pós-desmame, o símbolo "**caranguejo**" da Associação Brasileira de Criadores de Nelore (ABCZ) é marcado a fogo na face esquerda do rosto do animal, por técnico habilitado da ABCZ, por ocasião do Registro Genealógico de Nascimento (RGN). E, se o animal for aprovado para registro pela associação, no sobreano receberá por técnico habilitado da ABCZ, também, a marca de fogo[1] na perna traseira direita, com a inscrição BRGA (animais puros por avaliação) ou BRGE (animais puros de origem), seguidos do número individual de registro de cada indivíduo. **Avaliação da mãe**: peso, escore corporal e outras avaliações pós-parto.



Identificação recebida pelos Canchins (**A**) e os Nelores (**B**) nascidos na unidade.

cações de rotina no animal (tatuagem, marca de fogo, brinco visual, número de patrimônio da Embrapa) estão vinculadas ao microchip subcutâneo.

3 IDENTIFICAÇÃO ELETRÔNICA DE ANIMAIS, PARCERIA EMBRAPA-ANIMALLTAG

O projeto intitulado Desenvolvimento, validação e utilização de dispositivos eletrônicos – transponders em bovinos para fiscalização de sanidade animal e rastreabilidade, vinculado à Rede Brasil de Tecnologia – RBT/MCT/Embrapa/Finep 2005 – buscou avaliar a eficiência do uso de transponders desenvolvidos no Brasil para a identificação eletrônica de bovinos de corte e verificar o seu desempenho quanto aos índices de perda, falha de leitura e incidência de miíases por meio de testes a campo, visando o aperfeiçoamento do dispositivo. Os transponders para identificação eletrônica, testados integram um sistema de gerenciamento de dados de campo, com emissão de relatórios que auxiliam o pecuarista nas tomadas de decisões. O sistema foi desenvolvido através de parceria público-privada entre as empresas Embrapa Pecuária Sudeste (executora) e a AnimallTAG (interveniente), ambas situadas em São Carlos-SP, em projeto financiado pela Finep, entre 2005 e 2011.

Para a fase de teste e validação cumpriram-se três etapas:

1) **Etapa de bancada na empresa interveniente**: testes de injeção de plástico e ajuste da frequência de operação após a sobreinjeção do transponder. Foram medidos a distância de leitura e o índice de perdas na produção.

2) **Etapa de prova em laboratório**: foi testado o brinco eletrônico (Quadro 2D), de acordo com normas específicas. Os testes são definidos pelas ISO 24631-1, ISO 24631-3 e por guidelines publicados pelo ICAR (International Comittee for Animal Recording) (ICAR,2004). São feitos testes de resistência a abrasão, dureza, estresse do material plástico, contraste de marcação, envelhecimento acelerado, temperatura alta e baixa, choque mecânico, queda livre e hermeticidade. Após os testes, os brincos passam por uma certificação de compatibilidade com as normas ISO 11784:1996 e ISO 11785:1996 (International Organization for Standardization, 1996a, 1996b) e as normas ABNT NBR 15006:2003 e NBR 14766:2012 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003, 2012).
3) **Etapa de campo** (dividida em duas partes):
a) **Teste a campo:** essa etapa forneceu informações para ajustes do produto e incluiu treinamento e capacitação em boas práticas de colocação dos identificadores nos animais e uso dos equipamentos. Inicialmente, um protótipo foi testado e, associado às informações dos testes de laboratório e de campo, foi desenvolvido o produto final.
b) **Teste do sistema com todos os produtos finais**: após o término do desenvolvimento, os produtos finais passaram por nova etapa de testes a campo, visando verificar o índice de perdas, o bem-estar animal (avaliado pela incidência de miíases e outros sinais de desconforto) e o índice de falhas de leitura.

Para os testes e validação dos dispositivos foram identificados com os brincos eletrônicos bovinos das raças Nelore, Canchim e mestiços oriundos do sistema de produção de gado de corte da Fazenda Santa Rita (Grupo Agrindus), Descalvado/SP; Fazenda Vista Alegre (Grupo Dhama), Sud Menucci/SP; e da Fazenda Canchim, da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP.

O brinco eletrônico é um identificador fixado à orelha do animal, sem bateria, que transmite o número do animal por rádio frequência quando excitado por um leitor (transceptor). Sua função é identificar e não localizar o animal. A distância de leitura de um brinco eletrônico é pequena pelo fato de ele não possuir bateria. Normalmente, um brinco eletrônico é usado em conjunto com um brinco plástico visual fixado na outra orelha do animal. No Quadro 2 estão resumidos os cuidados na colocação dos identificadores.

Na tabela 1 estão os resultados dos testes realizados a campo para avaliação da eficiência da tecnologia no período 2006 a 2011, considerando o número e os per-

Quadro 2. Cuidados na colocação dos brincos.

Durante a colocação dos brincos considerou-se o bem-estar do animal, com aplicação de pomadas cicatrizantes e repelentes (unguento H) após a fixação do dispositivo. Para prevenir e evitar possíveis ocorrências de sangramento e hemorragia, os brincos foram colocados entre as duas nervuras da orelha do animal (A, B e C), com aplicadores do tipo alicate previamente aferidos (A). Após a aplicação, teve-se o cuidado de verificar se o conjunto macho e fêmea (D) que compõe o brinco apresentava giro livre (G) quando fixado na orelha do animal. O giro livre consiste na habilidade de o brinco fazer uma rotação completa, livremente, em relação ao machinho, após sua aplicação na orelha. Essa prática faz parte do manejo correto de aplicação, ajuda na ventilação do local e beneficia a rápida cicatrização, evitando possíveis machucados, aparecimento de miíase e, consequentemente, a perda da identificação. A leitura do transponder (brinco eletrônico) foi feita com uso do leitor AT05 (F), fabricado pela empresa AnimallTag.

Local da colocação do transponder auricular (A, B e C), formato do identificador eletrônico tipo botton e visual (D, E) e o transceptor leitor do brinco (F), giro livre (G) e pomada unguento (H).

Tabela 1. Resultados dos testes de campo considerando o número e o percentual de perda, falha de leitura e incidência de miíase dos identificadores de RFID aplicados em bovinos de corte.

Testes[2]	No de animais[1]	Ano	No de perda	No de falhas na leitura	No de casos de miíase
T1	18	2006	00	00	00
T2	10	2008	00	00	01 (10%)
T3	240	2008/2009	05 (2,1%)	01 (0,4%)	00 (0,0%)
T4	30	2008	00	00	00
T5	200	2008	01 (0,5%)	00	00
T6	66	2009/2010	00	00	00
T7	88	2009/2010	00	00	00
Total	**652**	**2010**	**06 (0,92%)**	**01 (0,15%)**	**01 (0,15%)**

[1] Os animais eram abatidos, sem interferência na rotina do sistema de produção, meses ou anos depois, em frigoríficos.
[2] Locais dos testes: T1: São Carlos/SP; T3: Sud Menucci/SP; T2, T4, T6 e T7: Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP; e T5: Descalvado/SP.

centuais de perda, falha de leitura e incidência de miíase, por meio de sete testes realizados nos municípios de São Carlos/SP, Descalvado/SP e Sud-Menucci/SP, envolvendo um total de 652 bovinos de corte.

Levando em consideração o resultado geral nos testes de campo, observou-se que houve 0,92% de perda de brinco, 0,15% de falha na leitura e 0,15% de incidência de casos de miíases. Uma observação importante foi que após o terceiro teste (T3) os identificadores passaram a ter um desempenho excelente, com sucesso quase absoluto (100% de eficiência nos testes, 6 e 7), uma vez que apenas no T5 ocorreu uma perda (falha) em duzentos animais identificados (1/200 = 0,5%). Esse fato decorre do ganho na prática dos testes e do aprimoramento de todos os dispositivos (brinco eletrônico – conjunto macho e fêmea, alicate, bastão e leitor) durante o tempo de execução do projeto.

Os resultados alcançados demonstraram que o sistema é competitivo, eficiente e eficaz, sendo respaldado pelo protocolo utilizado na Austrália para homologação de identificadores (NLIS, 2005), o qual considera como sistema de identificação ideal e comercializável aquele que atingir valores de perda de brinco abaixo de 3% (no projeto, a % média de perda ficou em 0,92%).

Após esses resultados promissores, a unidade aprovou e assinou em 2010 um contrato de cooperação técnica com a empresa parceira AnimallTAG para implantação do sistema eletrônico de identificação em 100% dos animais da Fazenda Canchim. Além desse contrato de cooperação técnica, a Embrapa Pecuária Sudeste, Embrapa/Sede e a AnimallTAG assinaram um contrato de comercialização do sistema.

4 COOPERAÇÃO TÉCNICA ENTRE EMBRAPA PECUÁRIA SUDESTE E ANIMALLTAG

Em conjunto com a AnimallTag foi implantado um sistema de coleta eletrônica de dados de todos os animais dos rebanhos de gado de corte, de leite e de ovinos que permitiu a obtenção eletrônica de dados individuais dos animais de forma mais rápida e precisa para 100% dos animais. O sistema dispensa o uso de anotações em planilhas de campo, e permite que o banco de dados de animais da Embrapa Pecuária Sudeste seja alimentado automaticamente. Os resultados esperados eram: otimização do processo de manejo de campo, diminuição de erros de anotação e digitação e retrabalho. A parceria compreendeu o fornecimento dos brincos eletrônicos, brincos visuais, leitores, adequação das balanças já existentes, treinamento e implantação da tecnologia para o gerenciamento total dos sistemas de produção animal da Embrapa Pecuária Sudeste e suporte técnico.

O início de implantação dos brincos eletrônicos no rebanho foi em maio de 2011. Num primeiro momento, todos os animais da unidade foram identificados. A partir dessa fase, todos os animais, recém-nascidos, recebiam o brinco eletrônico. O número de brincos colocados em cada ano de cooperação técnica está demonstrado na Tabela 2.

Durante esse período o sistema já se encontrava testado e validado a campo e pronto para ser produzido e comercializado.

5 CONTRATO DE COMERCIALIZAÇÃO ENTRE EMBRAPA E ANIMALLTAG

Uma relação de parceria para desenvolvimento de projetos de P&D envolve pontos fundamentais de

Tabela 2. Número de animais identificados com brincos eletrônicos durante os anos de 2011 a 2013, de acordo com cada espécie e/ou aptidão.

Espécie / Raça[3]	2011	2012	2013	Total (N)[1]	Perda (%)[1]
Bovinos de leite[2]	195	78	86	359	0,28
Bovinos de corte	992	1.190	312	2.494	6,82
Ovinos	204	482	423	1.109	2,07
Total	1.391	1.750	821	3.962	4,90

[1]Total geral de brincos aplicados no CPPSE e a porcentagem (%) de perda por rompimento do "machinho", rasgamento da orelha ou por falha de leitura durante os anos de 2011 a 2013 de acordo com cada tipo de identificador eletrônico, dentro do contrato de cooperação técnica entre Embrapa e AnimallTAG.
[2] Identificador subcutâneo – RFID/Glasstag – Testado em bovino de leite com colocação na parte traseira do úbere.
[3] Dentro do período de cooperação técnica, que durou 3 anos.

Tabela 3. Brincos vendidos durante o período do contrato de comercialização.

País	2011	2012	2013	2014	2015	Total[1]
Brasil	36.000	39.300	40.670	44.450	50.010	**210.430**
Paraguai	12.300	15.000	16.200	17.220	20.250	**80.970**
Chile	36.000	48.000	48.000	60.000	60.000	**252.000**
Bolívia	6.080	9.100	12.085	15.340	15.450	**58.055**
Outros	12.050	10.400	16.090	6.090	14.700	**59.330**
Total linha	**102.430**	**121.800**	**133.045**	**143.100**	**160.410**	**660.785**

[1] Dados fornecidos pela empresa AnimallTAG.

sucesso como, por exemplo, o alinhamento de procedimentos operacionais inerentes a cada parceiro e a capacidade de identificar oportunidades a partir de competências sinérgicas entre os parceiros. Essas características dependem de um processo de maturação da relação de parceria, ou seja, quanto mais se conhece os processos e a cultura do parceiro, maiores as chances de os projetos prosperarem. A parceria entre Embrapa e AnimallTAG é um exemplo de sucesso desse processo de maturação. A empresa iniciou uma relação de parceria com a Embrapa com uma prestação de serviço, na qual o nível de envolvimento entre os parceiros é baixo. No entanto, essa aproximação permitiu entender a forma de trabalho e identificar oportunidades de codesenvolvimento de produtos e, dessa forma, a parceria evoluiu para uma cooperação técnica que resultou em uma patente. Essa patente foi licenciada para o parceiro explorar comercialmente, fazendo com que a tecnologia fosse acessada pelo setor produtivo e trazendo seus benefícios para a cadeia produtiva. O contrato de exclusividade de comercialização dos brincos eletrônicos foi celebrado e assinado por Embrapa e AnimallTAG durante a 17ª Feira Internacional da Cadeia da Carne – Feicorte, Campinas/SP, para um período determinado de cinco anos (de 2011 a 2015), com pagamento de royalties para a Embrapa por unidade de brinco vendido. Além disso, a empresa pode utilizar o selo *Tecnologia Embrapa* associado ao produto comercial e contou com o apoio da Embrapa nas ações de promoção e comunicação mercadológica.

A Tabela 3 mostra a abrangência da tecnologia e o número de brincos comercializados pela AnimallTAG durante o período vigente do contrato de comercialização. Na Tabela 4 encontram-se o número de brincos vendidos nos últimos cinco anos, após o período do contrato de comercialização.

Observa-se que a comercialização dos brincos eletrônicos desenvolvidos pela parceria Embrapa-AnimallTAG quadruplicou-se nos cinco últimos anos quando comparados com o período do contrato de comercialização, passando de 660.785para mais de 2,7 milhões de brincos vendidos, evidenciando impacto positivo e altamente significativo da tecnologia.

6 TAG ATIVO - DISPOSITIVO PARA IDENTIFICAÇÃO E MONITORAMENTO DO TRÂNSITO DE ANIMAIS

O Tag Ativo foi um dispositivo novo (Figura 4) criado durante o desenvolvimento do projeto e

Tabela 4. Brincos vendidos nos últimos cinco anos, após o período do contrato de comercialização.

País	2019	2020	2021	2022	2023[1]	Total coluna[2]
Brasil	90.660	108.900	108.350	120.750	1.200.000	**1.628.660**
Paraguai	0	0	0	0	0	**0**
Chile	110.000	132.000	124.000	128.000	180.000	**674.000**
Bolívia	12.600	14.060	18.900	22.000	24.000	**91.560**
Outros	68.330	13.060	14.500	6.700	300.000	**402.590**
Total linha	**281.590**	**268.020**	**265.750**	**277.450**	**1.704.000**	**2.796.810**

[1] Dados informados até o mês de fevereiro de 2023.
[2] Dados fornecidos pela empresa AnimallTAG.

Figura 4. Formato do Tag Ativo, dispositivo hermeticamente fechado, com 16,5 x 15,5 cm.

que gerou depósito de patente: PI 0802577-0, de 18/07/2008, "DISPOSITIVO PARA IDENTIFICAÇÃO E MONITORAMENTO DO TRÂNSITO DE ANIMAIS". O Tag Ativo é um dispositivo fixado na parte externa dos caminhões de transporte de gado (Figura 5) que funciona como um transponder ativo dotado de bateria e que trabalha em duas frequências: 125 KHz e 2,4 GHz. Possui uma memória que permite gravar todos os dados do carregamento dos animais (capacidade: 17 mil registros). A gravação é feita por rádio frequência através do transceptor desenvolvido no projeto. O brinco eletrônico de identificação individual do animal é integrado ao Tag Ativo. O Tag Ativo pode ser li-

Figura 5. Foto do Tag Ativo acoplado ao caminhão de transporte de animais e os dispositivos eletrônicos para a identificação, gerenciamento e rastreabilidade bovina.

do com o caminhão em movimento, permitindo que um fiscal conheça todos os dados do transporte como: quantidade de animais, identificação de cada animal, peso, idade, procedência, destino, hora e data de embarque, dados sanitários e informações do caminhão.

7 INTEGRAÇÃO DO SISTEMA RFID COM O PROCESSO DE MANEJO DE CAMPO NA EMBRAPA PECUÁRIA SUDESTE

Em 2013, tendo como objetivo o aperfeiçoamento dos processos de coleta de dados da unidade, a área de TI iniciou um sistema de conexão entre um aplicativo para dispositivos móveis (tablets) desenvolvido na unidade e o bastão de leitura de brincos eletrônicos (RFID) desenvolvido pelo projeto (Figura 6). O sistema foi projetado para ser operado da maneira mais transparente possível, realizando checagens e informando ao operador os dados relativos de cada animal do rebanho, trabalhando *off-line* em áreas sem conexão e atualizando/sincronizando os dados em pontos de conexão de rede na unidade. Outra funcionalidade importante é a possibilidade de os gestores/usuários do sistema poderem consultar as biometrias coletadas *online* em qualquer local com conexão de internet, fora ou dentro das dependências da unidade.

A informatização propiciou o armazenamento e acesso ao banco de dados de animais da unidade e, assim, a gerência otimizada no processo de coleta de dados de manejo e de experimentos de pesquisa realizados na Fazenda Canchim. Com o avanço da adoção da identificação eletrônica dos animais foi possível interligar via Bluetooth o sistema desenvolvido a outras ferramentas práticas de manejo e pesquisa, também aplicadas em pecuária de precisão como: pesagem eletrônica individual, medidor eletrônico da emissão de gás metano, consumo individual de ração e água utilizando comedouros e bebedouros eletrônicos, informações vinculadas ao brinco eletrônico colocado na orelha do animal, garantindo-se assim a coleta individual dos dados. Obter dados individuais por animal é fundamental na estatística aplicada à experimentação animal.

Essas tecnologias integradas ao conceito de pecuária de precisão auxiliam no trabalho de rotina da unidade e, principalmente, na otimização e confiabilidade dos dados coletados nos experimentos de pesquisa.

8 APLICAÇÕES: SISTEMA RFID CONECTADO À PECUÁRIA DE PRECISÃO

A pecuária de precisão (PP) é um tema multidisciplinar que permite gerenciar animais individualmente adotando o monitoramento contínuo em tempo real dos aspectos de saúde, bem-estar, produção e reprodução, além de seu impacto ambiental (Berckmans, 2017). A adoção da identificação individual permitiu a validação da aplicação desses princípios em diferentes sistemas de produção pecuários.

Aplicação 1: Na Figura 7A tem-se uma visão do experimento realizado no complexo de confinamento da Embrapa Pecuária Sudeste, interligando um brinco eletrônico RFID auricular HDX posicionado na orelha de cada bovino com: 1) um medidor de metano (GeenFeed); 2) um bebedouro eletrônico; 3) um cocho eletrônico de consumo de ração (Growsafe); e 4) a pesagem de cada animal via balança eletrônica. Nesse trabalho, um dos objetivos foi avaliar o desempenho dos animais e a emissão de gás metano de dois grupos de bovinos da raça Nelore (Grupo 1: Animais em Pleno Sol; e Grupo 2: Sol e Sombra).

Aplicação 2: Tem-se a integração do brinco eletrônico RFID, localizado na orelha da vaca em lac-

Figura 6. Coleta eletrônica de dados, em manejo de rotina, com armazenamento no banco de dados chamado de "REBANHO" na Unidade.

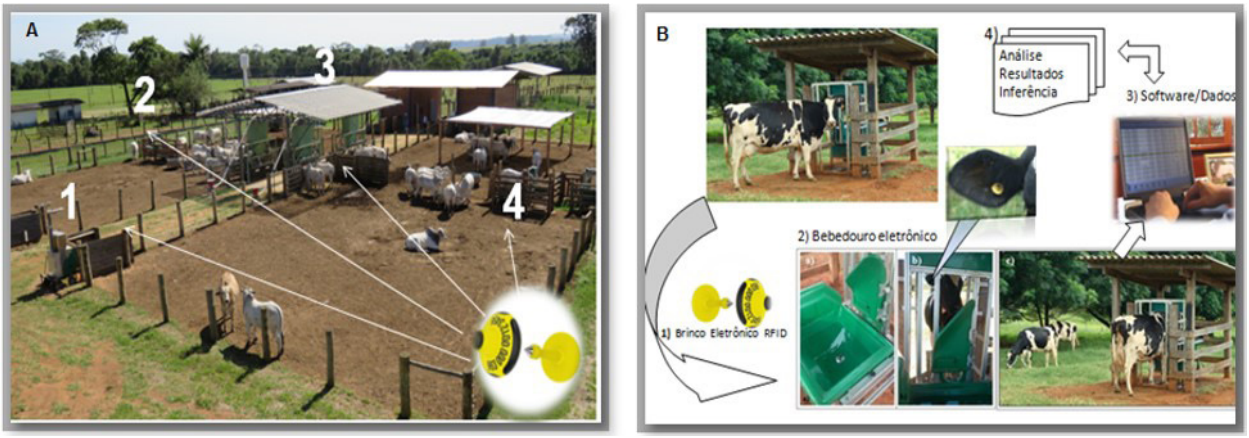


Figura 7. Visão geral da estrutura de campo dos experimentos: aplicação 1 (A) e 2 (B). **Foto:** Waldomiro Barioni Júnior.

tação, com o bebedouro eletrônico, que vincula automaticamente, via Bluetooth, o número eletrônico do brinco com o consumo individual de água de cada vaca de leite. Os animais foram submetidos a duas dietas (Dieta 1: concentrado com teor fixo de proteína bruta (20%); ou Dieta 2: concentrado com o teor de proteína ajustado de acordo com o desempenho do animal), por período de nove meses. O objetivo foi estimar o consumo médio de água registrado pelos bebedouros eletrônicos, por vaca e dieta, e o perfil médio do consumo de água ao logo do período experimental (Barioni Junior et al., 2017). Nesse estudo, visando o bem-estar do animal, um dos interesses foi verificar quantos litros de água devem estar disponíveis, durante um dia, para uma vaca em lactação (Figura 7B). Essa estimativa foi de 59,6 ± 0,71[a] litros na Dieta 1 e de 56,7 ± 0,70[b] na Dieta 2. Para cada dieta, foi usado um grupo de sete animais, composto por vacas das raças Jersey e Holandesa.

Podem ser citadas novas identificações e integrações com RFID na Embrapa Pecuária Sudeste como, por exemplo, uso de identificadores na forma de microchips subcutâneos com sensores para detectar temperatura corporal de fêmeas e o momento do cio (Termochips); uso de colares para verificar o comportamento animal e indicadores de bem-estar (ócio, ruminando, partejando, em pé, deitado etc.) e uso de colares no sistema robotizado de leite, entre outros.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- O projeto tornou a Embrapa Pecuária Sudeste referência em identificação eletrônica de animais, em rastreabilidade bovina e na pecuária de precisão;
- Consolidou a adoção e implantação do sistema de identificação eletrônica em todos os animais da Embrapa Pecuária Sudeste;
- Propiciou o renascimento intelectual e capacitação de vaqueiros na nova tecnologia. Quebra de paradigma, deixando as anotações em papel e adotando-se o gerenciamento eletrônico das atividades de campo;
- Despertou interesse por parte de governos do Brasil e outros países da América Latina em conhecer e adotar o sistema desenvolvido pelo projeto;
- Os produtos gerados no projeto constituem uma solução completa para gerenciamento e rastreabilidade.

10 CONCLUSÃO

O sistema de identificação eletrônica de animais desenvolvido pela Embrapa Pecuária Sudeste com parceria público-privado pode otimizar o sistema de rastreabilidade brasileiro, beneficiando todos os elos da cadeia produtiva bovina, integrando produtor, fiscalização e frigorífico; aumentando a confiabilidade da fiscalização e da informação; evitando erros e fraudes; garantindo o processo de gerenciamento e rastreabilidade dos bovinos; e contribuindo para que o consumidor final tenha um produto de melhor qualidade em sua mesa, além de colocar o Brasil numa posição mais competitiva na comercialização de animais e carnes para o mercado externo.

AGRADECIMENTOS

Ao Grupo Dhama e Agrindus, pela liberação de animais e de vaqueiros para os testes de campo. À Embrapa Pecuária Sudeste (Projeto Biotec #01.13.06.001.01) e RBT/MCT/Finep pelo apoio ao projeto, às parcerias Korth Rfid Ltda e AnimallTAG e aos demais colaboradores. Ao Setor de Negócios Tecnológicos (SNT) da Embrapa Sede na comercialização do sistema. Aos vaqueiros da Embrapa Pecuária Sudeste pelo empenho e dedicação

nos testes para o aprimoramento do sistema e na validação a campo e pela implantação do sistema para uso nas atividades de rotina e de pesquisa da unidade.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14766**: identificação de animais por radiofrequência – estrutura do código, Brasil, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15006**: identificação de animais por radiofrequência – conceitos técnicos, Brasil, 2003.

BARIONI JUNIOR, W.; MACHADO, C. G. C. F.; GARCIA, A. R.; NOVITA, S. E.; PARANHOS, N. E. Avaliação da performance de identificador eletrônico por radiofrequência para bovinos de corte, produzido no Brasil. In: CONGRESSO DE ZOOTECNIA DE PRECISÃO, 1., 2016, Florianópolis, SC. **Anais** [...]. São Paulo: Instituto Oswaldo Gessulli, 2016. v. 1. p. 1-5.

BARIONI JUNIOR, W.; NOVELLI, T. I.; MORELLI, M.; PALHARES, J. C. P. Automação do consumo de água de vacas em lactação visando o uso eficiente do recurso natural. In: CONGRESSO DE ZOOTECNIA DE PRECISÃO, 2., 2017, Florianópolis, SC. **Anais** [...]. São Paulo: Instituto Oswaldo Gessulli, 2017. v. 1. p. 1-5.

BERCKMANS, D. General introduction to precision livestock farming. **Animal Frontiers**, v. 7, p. 6-11, 2017. DOI: http://doi.org/10.2527/af.2017.0102.

BRASIL. Instrução normativa nº 17, de 13 de julho de 2006. **Diário Oficial da União**: seção 1, n. 134, p. 23-81, 14 jul. 2006.

BROWN-BRANDL, T. M.; ADRION, F.; MASELYNE, J.; KAPUN, A.; HESSEL, E. F.; SAEYS, W.; VAN NUFFEL, A.; GALLMANN, E. A review of passive radio frequency identification systems for animal monitoring in livestock facilities. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 35, n. 4, p. 579-591, 2019. DOI: http://doi.org/10.13031/aea.12928.

EDAN, Y.; HAN, S.; KONDO N.; SHUFENG, H. Automation in agriculture. In: NOF, S. Y. (Ed.). **Handbook of automation**. Berlin: Springer Verlag, 2009. p. 1095-1128. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-540-78831-7_63.

INTERNATIONAL AGREEMENT OF RECORDING PRACTICES. **Guidelines**. Tunisia: ICAR, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11784**: radio-frequency identification of animals: code structure. 2nd. ed. Geneva, Switzerland, 1996a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11785**: radio-frequency identification of animals: technical concept. Geneva, Switzerland, 1996b.

JACINTO, M. A. C.; OLIVEIRA, A. R.; ANDREOLLA, D. L. **Avaliação técnica e operacional do sistema nacional de classificação da pele bovina**. São Carlos, SP: EMBRAPA-CPPSE, 2009. (Boletim de Pesquisa, 22).

NLIS. **Protocol for NLIS device performance trials cattle**. Australia, 2005.

SCHLEPPE, J. B.; LACHAPELLE, G.; BOOKER, C. W.; PITTMAN, T. Challenges in the design of a GNSS ear tag for feedlot cattle. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 70, p. 84-95, 2010. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2009.09.001.

TOMES, J.; LUKESOVÁ, D.; MACHÁC, J. Meat traceability from farm to slaughter using global standards and RFID. **Agricultura Tropica et Subtropica**, v. 42, n. 3, p. 98-100, 2009.

TROTTER, M. G. Precision agriculture for pasture, rangeland and livestock systems. In: FOOD SECURITY FROM SUSTAINABLE AGRICULTURE:15th AGRONOMY CONFERENCE 2010. **Proceedings** [...]. Lincoln: Australian Society of Agronomy, 2010. Disponível em: http://regional.org.au/au/asa/2010/crop-production/precision-agriculture/7130_trotter.htm#TopOfPage. Acesso em: 31 set. 2024.

WATHES, C. M.; KRISTENSEN, H. H.; AERTS, J. M.; BERCKMANS, D. Is precision livestock farming an engineer's daydream or nightmare, an animal's friend or foe, and a farmer's panacea or pitfall? **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 64, p. 2-10, 2008. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2008.05.005.

Livestock IoT – LIoT: Ecossistema de software para pecuária

74

Livestock IoT – LIoT: Software Ecosystem for Livestock

Jonas Gomes[1], José Maria N. David[2], Regina Braga[3], Valdemar Vicente Graciano Neto[4], Wneiton Luiz Gomes[5], Leonardo Gravina Fonseca[6], Bruno Carvalho[7], Wagner Arbex[8,9]

[1] *Estudante, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora (MG), Brasil, jonas.gomes@estudante.ufjf.br*
[2] *Professor, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora (MG), Brasil, jose.david@ufjf.br*
[3] *Professor, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora (MG), Brasil, regina.braga@ufjf.br*
[4] *Professor, Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia (GO), Brasil, valdemarneto@ufg.br*
[5] *Analista, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, wneiton.gomes@embrapa.br*
[6] *Analista, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, leonardo.gravina@embrapa.br*
[7] *Pesquisador, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, bruno.carvalho@embrapa.br*
[8] *Professor, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora (MG), Brasil, wagner.arbex@ufjf.br*
[9] *Analista, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, wagner.arbex@embrapa.br*

RESUMO

Com o advento da agricultura digital, tecnologias habilitadoras como, por exemplo, a Internet das Coisas (IoT), mostraram-se imprescindíveis para a transformação digital da pecuária. Mais recentemente, em conjunto com essa revolução, novos preceitos foram adotados pela sociedade, que passou a valorizar não só o produto, mas também a necessidade de conhecer sua autenticidade e origem, a forma e condições de sua obtenção e, ainda, se essas podem provocar algum dano social ou ambiental. A sociedade passou a requerer nos processos produtivos práticas de governança ambiental, social e corporativa – do inglês, *Environmental, Social and Corporate Governance* (ESG) –, exigindo da pecuária uma visão ampla e novas entregas, além da produção de alimentos com proteína de origem animal. A Ciência da Computação, mais especificamente com foco na área de Engenharia de Software, busca tecnologias que possam ser aplicadas em problemas contemporâneos no ambiente de IoT. Neste cenário, surge a necessidade da criação do LIoT ou Livestock IoT, um Ecossistema de Software (ECOS), do inglês *Software Ecosystem*, que diferencia a "vertical" da pecuária sob um conceito de IoT mais amplo, com diferentes requisitos, aplicações, público-alvo e estratégia. A pecuária, ao trabalhar, entre outros aspectos, com seres vivos como parte de seu processo de produção, apresenta a necessidade de requisitos e aplicações notadamente diferenciadas de outras atividades de produção. O ECOS LIoT visa integrar as camadas tecnológicas de uma arquitetura de IoT – quais sejam, as camadas de dispositivos, rede, suporte a serviços e aplicações e, ainda, a camada de segurança da informação – aos serviços e *outcomes* necessários à pecuária. O ECOS LIoT cria e estrutura recursos e serviços que permitem capturar, armazenar e interpretar dados, promovendo a tomada de decisão inteligente a partir da integração entre a pecuária de precisão e a inteligência computacional. Este texto apresenta fundamentos e preceitos básicos para tornar o ECOS LIoT uma realidade.

Palavras-chave: ecossistema de software; IoT; transformação digital; pecuária de precisão; sistema de produção pecuária.

ABSTRACT

Digital agriculture caused the emergence of enabling technologies, such as the Internet of Things (IoT), which are essential for the digital transformation of livestock. More recently, with this revolution, new assumptions were adopted by society, which began to value not only the product but also the need to know its authenticity and origin, the form, and conditions for obtaining it, even if it may cause social or environmental damage. Society began to require environmental, social, and corporate governance practices from production processes, demanding a broad vision from livestock and new deliveries in addition to producing food with animal protein. Computer Science, more specifically focused on Software Engineering, seeks technologies that can be applied to contemporary problems in the IoT environment. In this scenario, the need arises to create LIoT or Livestock IoT, a Software Ecosystem (ECOS) that differentiates the livestock vertical under a broader IoT concept with different

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000064

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

requirements, applications, target audiences, and strategies. When working with living things as part of its production process, Livestock presents the need for requirements and applications that are notably different from other production activities. ECOS LIoT aims to integrate the technological layers of an IoT architecture – such as the device, network, service, application support layers, and information security layer – with the services and outcomes necessary for livestock. ECOS LIoT creates and structures resources and services that allow data to be captured, stored, and interpreted, promoting intelligent decision-making based on the integration between precision livestock and computational intelligence. This text presents fundamentals and basic precepts to make ECOS LIoT a reality.

Keywords: software ecosystem; IoT; digital transformation; precision livestock farming; livestock production system.

1 INTRODUÇÃO

Uma das conclusões do painel "Tiraremos leite de pedra ou choraremos o leite derramado? A Engenharia de Software na era da digitalização e manufatura total", parte do VIII Congresso Brasileiro de Software, foi a de que a Engenharia de Software não apresentava as tecnologias necessárias para o desafio da transformação digital no âmbito da Quarta Revolução Industrial (Arbex et al., 2017).

No caso específico, a pecuária, entre outros aspectos, ao trabalhar com seres vivos como parte de seu processo de produção apresenta a necessidade de requisitos e aplicações notadamente diferenciadas dos de outras atividades de produção.

O Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Leite (Embrapa Gado de Leite) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) inaugurou em 2020 um sistema de produção de leite com confinamento dos animais em um *compost barn* ou, em tradução livre, "estábulo com compostagem", sendo este sistema denominado "Vacas e Pessoas Felizes".

O *compost barn* é um sistema de confinamento de animais, nesse caso vacas para produção de leite, que tem como principais objetivos a melhoria do conforto e do bem-estar dos animais. Assim, como consequência direta, promove o aumento da produtividade do rebanho (Silano; Santos, 2012). Por ser um sistema de confinamento, então com possibilidade de controle e medição de diversos parâmetros relativos aos animais, ao ambiente e à produção de leite, quer seja com o uso de sensores ou outros dispositivos e sistemas com acesso à Internet, este grupo de estudos e pesquisa iniciou o desenvolvimento do projeto "e-Livestock – Pecuária Digital de Decisão" no âmbito do programa de bolsas Residência Zootécnica Digital da Embrapa Gado de Leite. Por sua vez, o e-Livestock integra-se às ações propostas pela Rede de Agricultura de Precisão (Rede AP) da Embrapa.

O conceito de IoT foi introduzido por Kevin Ashton em 1999, como relatado pelo próprio em Asthon (2009), em relação à vinculação de identificação por radiofrequência (RFID) para cadeias de suprimentos para Internet (Villa-Henriksen et al., 2020), mas não apresenta uma definição sobre IoT. Está também relacionado a ligação de uma rede de "objetos" através da Internet sem intervenção humana direta. A aplicação da IoT na agricultura e na pecuária é vantajosa devido à possibilidade de monitorar e controlar muitos parâmetros diferentes em um contexto interoperável, escalável e aberto com um uso crescente de sensores automatizados (Villa-Henriksen et al., 2020). Uns dos objetivos da aplicação da IoT na pecuária é trazer maior acurácia no uso das informações para tomada de decisão.

Um ECOS, por definição, consiste em um conjunto de atores e artefatos, internos e externos a uma organização ou comunidade, que interagem sobre uma plataforma tecnológica comum (Bosch, 2009). Assim, a abordagem de construção de um ECOS provoca impactos em modelos de negócios e nas várias decisões que permeiam o ciclo de vida do software, quer sejam relativos a modelos de arquitetura, de governança ou colaboração. Neste sentido, o uso de dispositivos IoT integrados a um ECOS voltado para modelos de negócios relacionados à pecuária pode trazer benefícios, considerando-se que as diversas aplicações integradas ao ECOS podem usufruir das informações advindas dos dispositivos IoT e, mais ainda, a partir dessas informações e da integração das aplicações do ECOS, prover uma visão holística dos modelos de negócio relacionados à pecuária.

Nesse sentido, a proposta do projeto e-Livestock é desenvolver uma plataforma ECOS, denominada LIot, para capturar, armazenar e interpretar dados, considerando um conjunto de aplicações que compartilham essa plataforma. O LIoT permite então uma visão integrada das informações e dos serviços promovidos pela plataforma, criando uma visão integrada e holística do modelo de negócios na pecuária. Com isso, promove a tomada de decisão inteligente no trato dos animais e, como consequência, a execução de eventos automatizados.

Este capítulo apresenta os principais conceitos relacionados ao desenvolvimento do ECOS LIoT e detalha os próximos passos a serem desenvolvidos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Um Ecossistema de Software (ECOS), de maneira geral, pode ser considerado um conjunto de soluções e serviços integrados, que compartilham um mesmo mercado, recursos e outras soluções de software, e de atores que compartilham e aproveitam informações na rede de aplicações e compartilhamento de dados formada. Portanto, ECOSs são ambientes que permitem uma maior gama de soluções de software que atendam aos usuários. Além das vantagens de atender às demandas dos usuários, outras vantagens podem ser obtidas estabelecendo-se um ECOS em torno de uma plataforma de software (Bosch, 2009), tais como:

- Maior valor dos recursos oferecidos;
- Maior atratividade para novos usuários;
- Maior aderência à plataforma;
- Acelerar a inovação através da coinovação;
- Colaboração com parceiros para compartilhar os custos de inovação;
- Oferecer soluções criadas por desenvolvedores externos para a plataforma; e
- Oferecer custos reduzidos de aquisição e manutenção de recursos desenvolvidos por colaboradores externos.

Para isso, a construção da plataforma do ecossistema deve considerar alguns atributos de qualidade. A arquitetura da plataforma do ecossistema necessita de acréscimos de módulos para atender às necessidades de novos parceiros e demandas por tecnologias para o *compost barn*, i.e., extensibilidade. Portanto, a facilidade com que as arquiteturas expandem para reutilizar novos módulos e para ampliar a sua longevidade é importante para que os sistemas que fazem parte do ecossistema atendam prontamente aos requisitos funcionais dos usuários.

Por outro lado, o *compost barn* necessita evoluir em termos de tamanho em relação ao espaço físico, às funcionalidades, e à variedade de tipos de dados que necessitam ser coletados, i.e., escalabilidade. Nesse sentido, diferentes sensores necessitam ser instalados para tratar os requisitos funcionais e a quantidade de animais que transitam no *compost barn*. Ao oferecermos uma arquitetura que se adapta a esta diversidade, o ecossistema pode evoluir, atender a diferentes contextos nas fazendas e permitir que outros sítios possam interoperar e colaborar, i.e., interoperabilidade. Como resultado, decisões para a saúde animal podem ser tomadas baseadas nas experiências adquiridas em outros momentos.

Nesse aspecto, um ECOS relacionado à pecuária pode trazer vantagens estratégicas para o modelo de negócio, ainda mais se considerarmos o uso de dispositivos IoT integrados, permitindo o compartilhamento de informações. Neste trabalho, essa perspectiva é investigada considerando o sistema *compost barn* com o uso de dispositivos IoT integrados ao sistema e a abordagem de uma plataforma de ECOS, para captura, processamento e análise integrada dos dados e compartilhamento das informações entre os diversos serviços promovidos pela plataforma.

A Figura 1 apresenta uma visão geral e abstrata de um ECOS voltado para pecuária de confinamento, na qual dispositivos IoT são integrados ao sistema de forma a capturar dados relacionados (Gomes et al., 2023). O LIoT (Livestock IoT) ECOS tem como objetivo prover esta plataforma integrada em que o uso integrado de dados e serviços possa ser provido.

A plataforma é dividida em cinco camadas principais. Cada camada provê um conjunto de serviços

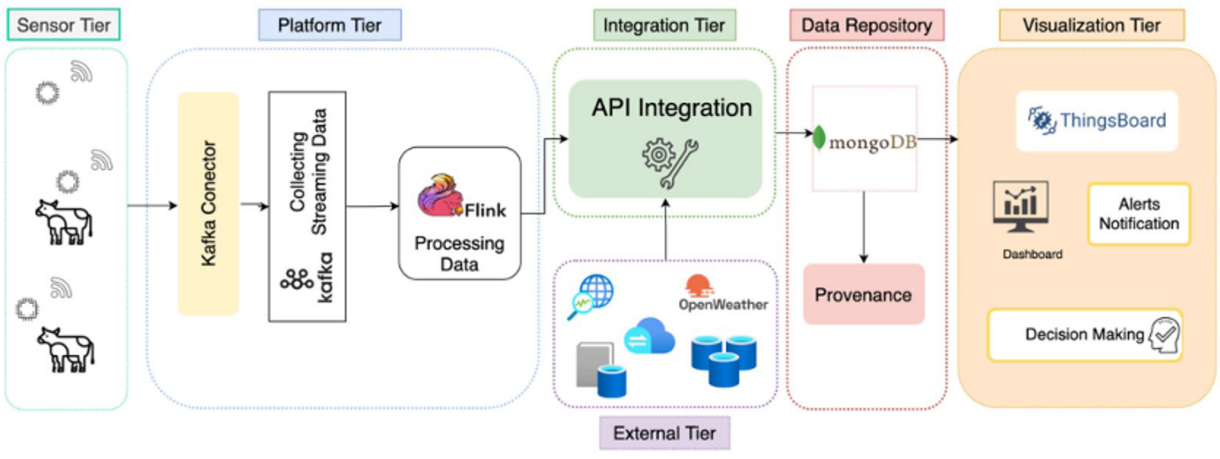


Figura 1. Visão geral da plataforma LioT.

específicos para suporte a aplicações relacionadas. A primeira consiste na coleta do *streaming* de dados dos dispositivos de IoT em tempo real. A camada de processamento gerencia e processa os dados coletados, promovendo uma visão integrada deles a partir do interrelacionamento dos dados advindos dos diferentes dispositivos. A camada de integração tem o papel de agregar os dados de serviços externos e do contexto, como, por exemplo, dados meteorológicos e previsões de tempo. A camada de serviços externos compreende outras fontes, bases de dados e serviços. E, por fim, a camada de visualização, que tem como objetivo permitir que aplicações possam utilizar os serviços providos pela plataforma como forma de auxiliar na tomada de decisão. Todas as cinco camadas são apresentadas a seguir:

- **Camada de *streaming* de dados:** agrega todos os sensores presentes no espaço físico dos *compost barn*, sejam dispositivos instalados em animais ou no ambiente. Além dos dados advindos dos dispositivos de IoT, dados de diferentes fontes e serviços e com diferentes naturezas podem ser agregados, incluindo arquivos de texto e planilhas. Para a coleta dos dados de *streaming*, utilizamos um *wrapper* específico, representado na Figura 1 como "Kafka Conector". Este *wrapper* faz uma interface para entrada de dados no sistema. Diferentes dispositivos e serviços podem ser integrados a esta camada, como serviços externos de dados ambientais e serviços para processamento seletivo de dados;
- **Camada de processamento:** camada responsável por processar os dados coletados e integrá-los, considerando o relacionamento entre eles. Esta camada pode utilizar serviços específicos como processamento ontológico ou uso de algoritmos inteligentes para a integração dos dados, gerando conhecimento novo. Assim, podem fazer parte dessa camada serviços de processamento de ontologias, serviços relacionados ao processamento de algoritmos de Machine Learning, entre outros;
- **Camada de integração:** esta parte é responsável por receber e integrar os dados processados pelos sensores. A camada de integração também pode agregar informações de outros repositórios, serviços e APIs externas. A principal vantagem desta camada é poder integrar e armazenar dados heterogêneos de maneira integrada, provendo uma visão holística deles, de forma a serem utilizados pelos serviços e aplicações da plataforma. Esta camada também está relacionada com a rastreabilidade dos dados, uma vez que os dados serão agregados e armazenados, permitindo verificar sua origem e o processo pelo qual o dado foi transformado. Isso garante maior confiabilidade à plataforma como um todo;
- **Camada de fontes externas:** esta camada representa serviços externos, bases de dados, bases históricas, redes sociais e quaisquer fontes externas de dados que possam ser utilizadas para agregar aos dados coletados pela camada de *streaming*. A partir desta camada, novas fontes podem ser utilizadas pela plataforma. Ao agregar redes sociais, por exemplo, é possível promover os serviços da plataforma de maneira direcionada, considerando possíveis novos usuários e serviços relacionados a algum tipo de produção agrícola;
- **Camada de visualização:** esta camada engloba serviços e aplicações para auxiliar na visualização integrada das informações e na tomada de decisão. É possível analisar e interpretar os dados em diferentes granularidades de tempo. Além disso, diferentes serviços podem ser agregados, com o uso de *dashboards* e aplicações inteligentes auto adaptativas, que podem gerar, por exemplo, alertas para o usuário sobre eventos críticos, como, por exemplo, possíveis surtos de doenças ou alertas sobre possíveis inundações ou até mesmo possíveis problemas nutricionais dos animais, entre outros.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando um conjunto de dados de temperatura e umidade do *compost barn*, pode-se analisar alguns resultados iniciais do uso da plataforma. Ao agregar dados dos sensores juntamente com dados de sensores do ambiente, foi possível apresentar uma visão integrada das informações. A partir dessa visão integrada, o uso de *dashboards* permitiu uma análise detalhada das informações. Além disso, a partir de notificações de alertas específicos, considerando a temperatura do ambiente, os pesquisadores/produtores são capazes de tomar decisões rapidamente e ainda ter uma visão geral do ambiente que está sendo monitorado. Por exemplo, foi possível disparar alarmes com base em regras, tal como "o dispositivo 'A' realiza uma leitura de temperatura de 27 ºC que ultrapassa o limite definido, então é gerado um alerta de 'Alta temperatura'". Cada alarme tem uma gravidade que pode ser definida como Crítica, Principal, Secundária, Aviso ou Indeterminada (classificada por prioridade em ordem decrescente). Os profissionais responsáveis pelo *compost barn* puderam, então, receber notificações de alerta via SMS e e-mail.

Foi possível perceber que a plataforma atende satisfatoriamente ao objetivo de processar os dados do *compost barn*. Os produtores, ao visualizarem dados do

contexto, como previsão climática, podem fazer ajustes mais sofisticados na temperatura do ambiente do *compost barn,* evitando mudanças bruscas que podem afetar a produção dos animais. Assim, tem-se indícios de que a plataforma auxilia na tomada de decisões por meio da combinação de dados de sensores com dados de contexto que podem ser exibidos em gráficos e gerar notificações automáticas. O compartilhamento das informações entre os serviços e aplicativos da plataforma pode melhorar o modelo de negócios da pecuária como um todo.

As decisões no agronegócio precisam ser tomadas considerando a grande diversidade de informações e dispositivos presentes. Além do mais, informações de contexto muitas vezes não são utilizadas, devido à complexidade de integrar dados heterogêneos. Uma plataforma de ECOS pode ajudar a solucionar esses problemas de coleta, processamento e visualização de dados em tempo real para apoiar a tomada de decisão. Ainda, com o uso de uma camada de integração é possível melhorar as decisões com informações externas e dados de outras fontes de dados, históricos e de redes sociais.

4 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou uma plataforma para um Ecossistema de Software, denominada LIoT, desenvolvida sob o conceito de IoT mais amplo considerando diferentes requisitos, aplicações e públicos-alvos externos.

Esta plataforma apresenta algumas camadas que englobam alguns serviços, como: *streaming* de dados dos dispositivos de IoT em tempo real; gerenciamento de dados coletados em tempo real; suporte à integração de dados de diferentes dispositivos de IoT externos; visualização de dados para o suporte à tomada de decisões; e uma camada para a integração de outros sistemas externos à plataforma.

Ao possibilitar a coleta e processamento dos dados obtidos do *compost barn*, percebe-se que eles permitem aos produtores a realização de "ajustes" mais sofisticados no processo de produção, com o objetivo de gerenciar informações para a tomada de decisões em seus sistemas de produção pecuária.

O presente trabalho está em desenvolvimento e suas próximas fases vão exercitar aspectos de extensibilidade, escalabilidade e interoperabilidade no que tange aos aspectos técnicos relativos à continuidade de ampliação do desenvolvimento LIoT.

Contudo, no que concerne aos aspectos dos conceitos sobre os quais se apoia, a abrangência do LIoT deve, ainda, ser integrada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela ONU (Organização das Nações Unidas, 2015, 2018) como uma ampliação da ótica ESG já incorporada.

Os ODS, entre outras questões, propõem processos e sistemas de produção que, por exemplo, não sejam agressivos ao ambiente ou ao clima.

AGRADECIMENTOS

Face aos recursos que estão permitindo a realização deste trabalho, os autores agradecem à Embrapa Gado de Leite, à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), à Universidade Federal de Goiás (UFG), à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (Fapemig), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

ARBEX, W.; SOARES, S.; GARCIA, A.; MACHADO, I.; ANDRADE, R. Painel CBSOFT/SBES. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOFTWARE, 8., 2017, Fortaleza. **Proceedings [...]**. Fortaleza: UFC, 2017. Disponível em: http://www.lia.ufc.br/~cbsoft2017/painelcbsoft/. Acesso em: 15 nov. 2022.

ASHTON, K. That "Internet of Things" Thing. **RFID Journal**, v. 22, p. 97-114, 2009.

BOSCH, J. From software product lines to software ecosystems. In: INTERNATIONAL SOFTWARE PRODUCT LINE CONFERENCE – SPLC '09, 13., 2009, Cidade. **Proceedings [...]**. San Francisco: Editora ACM, 2009. p. 111-119.

GOMES, J.; ESTEVES, I.; GRACIANO NETO, V. V.; DAVID, J. M. N.; BRAGA, R.; ARBEX, W.; KASSAB, M.; OLIVEIRA, R. F. A scientific software ecosystem architecture for the livestock domain. **Information and Software Technology**, v. 160, pp. 107240, 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando Nosso Mundo**: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, 2015. Disponível em: https://nacoesunidas.org/wpcontent/uploads/2015/10/agenda2030-pt-br.pdf. Acesso em: 15 nov. 2022.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**, 2018. Disponível em: https://nacoesunidas.org/pos2015/. Acesso em: 15 nov. 2022.

SILANO, C.; SANTOS, M. V. Você sabe o que é um Compost Barn? **Leite Integral**, 2012. Disponível em: https://www.revistaleiteintegral.com.br/noticia/voce-sabe-o-que-e-um-compost-barn. Acesso em: 15 nov. 2022.

VILLA-HENRIKSEN, A.; EDWARDS, G. T. C.; PESONEN, L. A.; GREEN, O.; SORENSEN, C. A. G. Internet of things in arable farming: implementation, applications, challenges and potential. **Biosystems Engineering**, v. 191, p. 60-84, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.12.013.

75

TouceiraTech: um protótipo de FMIS para Pecuária de Precisão

TouceiraTech: a FMIS prototype for precision livestock

Ânderson Fischoeder Soares[1], Naylor Bastiani Perez[2], Leonardo Bidese de Pinho[3]

[1] *Mestre em Computação Aplicada, Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus Bagé, Bagé (RS), Brasil, anderson_fischoeder@hotmail.com*

[2] *Pesquisador Doutor, Embrapa Pecuária Sul, Bagé (RS), Brasil, naylor.perez@embrapa.br*

[3] *Professor Doutor, Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus Bagé, Bagé (RS), Brasil, leonardopinho@unipampa.edu.br*

RESUMO

O sistema TouceiraTech foi projetado com princípios de Farm Management Information Systems (FMIS), para predição de disponibilidade de forragem, aplicando técnicas de aprendizado de máquina sobre dados do pasto, decorrentes de métricas de amostragem direta destrutiva indexadas à série histórica de dados meteorológicos. Após aprimoramentos, o sistema realiza a coleta automática de variáveis climáticas, de previsão meteorológica e de imagens de satélite, processando-as para estimação de variáveis de entrada no modelo de predição, como evapotranspiração, soma térmica, déficit/excesso hídrico e índice de vegetação. TouceiraTech realiza predições de taxa de acúmulo de forragem com significativa acurácia, as quais são apresentadas ao usuário de forma intuitiva, em mapas coloridos.

Palavras-chave: sistemas de apoio a decisão; ajuste de lotação; modelos de predição de massa de forragem; aprendizado de máquina.

ABSTRACT

The TouceiraTech system was designed, based on principles of Farm Management Information Systems (FMIS), for forage availability prediction, applying machine learning techniques on vegetation data resulting from historical destructive direct sampling processes and a meteorological data set. After improvements, the system automatically collects climate variables, weather forecasts, and satellite images, processing them to estimate input variables in the prediction model, such as evapotranspiration, thermal sum, water deficit/excess, and vegetation index. TouceiraTech predicts forage accumulation with significant accuracy, presenting it to the user in an intuitive manner with colored maps.

Keywords: decision support systems; stock rate adjustment; forage mass prediction models; machine learning.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000061

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o avanço nas Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) tem criado oportunidades para inovações em diferentes áreas, com destaque para o contexto da agropecuária. Dentro desta grande área, a bovinocultura de corte assume relevância, com seus desafios específicos. Para que os produtores rurais especializados em sistemas pecuários maximizem seu lucro de forma sustentável, é fundamental fazer a gestão dos seus sistemas de pastejo, representados pela combinação integrada entre os componentes animal, planta, solo, fatores ambientais e o método de pastejo, com o objetivo de se atingirem metas específicas (Pedreira, 2002). O correto uso das pastagens está positivamente correlacionado com a produtividade, que pode ser definida como a quantidade de peso vivo (PV) produzido por unidade de área (Fernandes et al., 2004). Entretanto, neste contexto, é preciso considerar dois aspectos fundamentais: o primeiro está relacionado ao aumento da taxa de lotação da pastagem, que permite uma maior eficiência de colheita da forragem, e o segundo é relativo à necessidade de se evitar a degradação da pastagem pela desfolha excessiva das plantas forrageiras ao longo do tempo. Assim, para manter o equilíbrio, é necessário ajustar o aumento da lotação com uma maior produção de pasto. De maneira geral, a produtividade das pastagens pode oscilar bastante. A engorda de bovinos em pastagens degradadas pode resultar em um ganho de apenas 30 kg de PV/ha/ano, enquanto pastagens submetidas a um bom manejo podem produzir em torno de 240 kg de PV/ha/ano (Kichel et al., 1999). Esta variação na produtividade é impactada diretamente pela oferta de forragem (OF), que estabelece a relação quantitativa e instantânea entre a massa de forragem disponível (MF), expressa em quilograma de matéria seca (MS), e a lotação animal, expressa em quilograma de peso vivo. Um manejo adequado da OF torna possível melhorar o ganho de peso dos animais e, com isso, incrementar a produtividade da pastagem (Andrade et al., 2005). Logo, conclui-se que a gestão da relação entre MS de pasto disponível e a lotação animal é essencial em um sistema de pastejo sustentável, garantindo a qualidade e a quantidade necessárias para a alimentação dos animais, sem a degradação das pastagens.

O desafio para a sustentabilidade de uma pastagem é equilibrar os interesses dos animais, traduzidos por uma alimentação adequada, com as necessidades das plantas forrageiras (Melado, 2007). Assim, além do ajuste adequado da OF, durante um período específico de tempo (Pedreira, 2002), também é necessário disponibilizar pastagens com valores nutritivos adequados (Silveira et al., 2005), tendo em vista a capacidade de os bovinos selecionarem sua própria dieta durante o pastejo. Normalmente, a estimativa da OF, para determinado período de tempo, faz uso do corte da forragem combinado com o uso de gaiolas de exclusão do pastejo (Machado; Kichel, 2004). Entretanto, este método é destrutivo e demanda significativo trabalho para coleta das amostras estratificadas. Ademais, a estimativa da MF instantânea obtida, realizada a partir do corte e secagem da forragem, é imprecisa. A imprecisão do método aumenta quando, ao erro amostral, decorrente do mau posicionamento do local do corte, soma-se a estimativa da taxa de acúmulo de forragem (TA) para o período subsequente, que é realizada a partir do crescimento do pasto verificado no mês anterior. Assim, dada a influência de variáveis meteorológicas, que dificilmente se repetem, a estimativa da TA fica severamente prejudicada, resultando em desajustes que prejudicam o bom manejo do pasto.

Diferentes TICs surgem como potenciais soluções não apenas para aumentar a eficiência da estimativa de OF e TA, mas para gestão do sistema como um todo. O modelo apresentado por Schulte (2019), baseado em aprendizado de máquina e dedicado à predição de MF, utiliza os dados históricos de cortes realizados em experimentos de produção animal na Embrapa Pecuária Sul, associando variáveis meteorológicas que impactam o crescimento das pastagens. Nesse modelo, os dados meteorológicos manualmente obtidos de uma estação meteorológica de superfície automática, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), próxima aos experimentos, são inseridos juntamente com os dados de produção de forragem, obtidos por cortes, em um banco de dados que é utilizado para aprendizagem de máquina e posterior predição de MF. Os resultados do modelo mostraram que a técnica utilizada, um tipo especial de Rede Neural Recorrente (Recurrent Neural Networks - RNN) denominada Long Short-Term Memory (LSTM), poderia servir de base para um Sistema de Apoio a Decisão (SAD) para pecuaristas. Ou seja, conceber um Farm Management Information System (FMIS), composto por módulos capazes de realizar a coleta, o processamento, o armazenamento e a visualização dos dados espacializados referentes às áreas de interesse, voltado para pecuária de precisão, especializado para ajuste de taxa de lotação a partir de predição da OF com significativa acurácia. Contudo, uma das limitações é que o modelo se ampara apenas em dados meteorológicos históricos, tornando relevante o seu aprimoramento com a coleta automática de dados a partir de estações meteorológicas remotas, próximas à fazenda, assim como

de previsões meteorológicas atualizadas. Também se considerou importante incorporar amostras indiretas da MF, de maneira automatizada, a partir de imagens, visto o custo operacional e a suscetibilidade a erro inerentes aos processos de amostragem destrutiva periódica. Para este fim, especulava-se o uso de índices de vegetação extraídos de sensores orbitais, para estimar a altura e/ou a densidade do pasto. Por fim, notou-se a relevância de estudar alternativas para a apresentação dos dados espaçotemporais correspondentes à evolução da pastagem, de forma intuitiva para pecuaristas (Soares et al., 2020).

Considerando-se essas necessidades de aprimoramento, três questões de pesquisa foram propostas: (i) É possível propor, implementar e avaliar um protótipo de prova de conceito de FMIS partindo de princípios de pecuária de precisão, capaz de coletar, armazenar, processar e visualizar dados de MF necessários para o ajuste de taxa de lotação?; (ii) É possível introduzir no modelo já existente dados de previsão meteorológica que pudessem aumentar a eficácia na predição da MF para um período de 30 dias subsequentes?; (iii) É possível, por meio do processamento de imagens de satélite, obter, com acurácia suficiente, amostras indiretas referentes à MF que possam ser usadas como entrada no modelo de RNN desenvolvido, substituindo parte do processo de amostragem direta? O desenvolvimento das atividades de pesquisa para elucidar essas questões, apresentado a seguir, sintetiza o processo de P&D relativo ao protótipo de prova de conceito denominado TouceiraTech, o qual aplica e aprimora o método de predição desenvolvido por Schulte et al. (2019).

2 PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO TOUCEIRATECH

Conforme Soares (2021), o processo de desenvolvimento consistiu em sete etapas. A etapa inicial, necessária para compreensão detalhada do modelo de predição de disponibilidade de forragem usado como base, foi seguida por um estudo de avaliação das TICs passíveis de serem empregadas na concepção da solução. As etapas posteriores envolveram a especificação da proposta, a implementação e a experimentação de novas funcionalidades do sistema, incluindo a coleta automatizada dos dados meteorológicos, a inclusão da previsão meteorológica e das imagens de satélite, como entrada para o modelo de predição de MF. A sexta etapa consistiu na criação de um método indireto de obtenção de informações da pastagem, utilizando o Índice de Vegetação com Diferença Normalizada (NDVI) para cada uma das áreas de estudo. Por fim, a etapa sete correspondeu ao desenvolvimento do módulo de visualização dos resultados em forma de gráficos de linha, mapas de vegetação e GIF animada do comportamento temporal do NDVI na área de interesse.

A Figura 1 apresenta uma visão geral do modelo da arquitetura do protótipo de FMIS proposto, sendo que os retângulos representam cada módulo do sistema em que é possível verificar a coleta automatizada de dados históricos meteorológicos, de previsão meteorológica e de imagens de satélite. A arquitetura permite agregar diferentes formatos de fontes de dados sobre pastagem e, com isso, realizar estudos de áreas de interesse em diferentes escalas, área total ou subdivisões (potreiro), considerando a diversidade natural que ocorre dentro das áreas de manejo. O banco de dados espacial viabiliza o processamento de imagens e sua utilização como fonte de dados sobre a pastagem. A partir do pré-processamento dos dados, utilizando operações e cálculos sobre os dados armazenados no sistema sobre áreas de interesse, é possível alimentar um modelo com acurácia suficiente, para predizer a evolução de indicadores de disponibilidade de forragem. Com base nos dados de

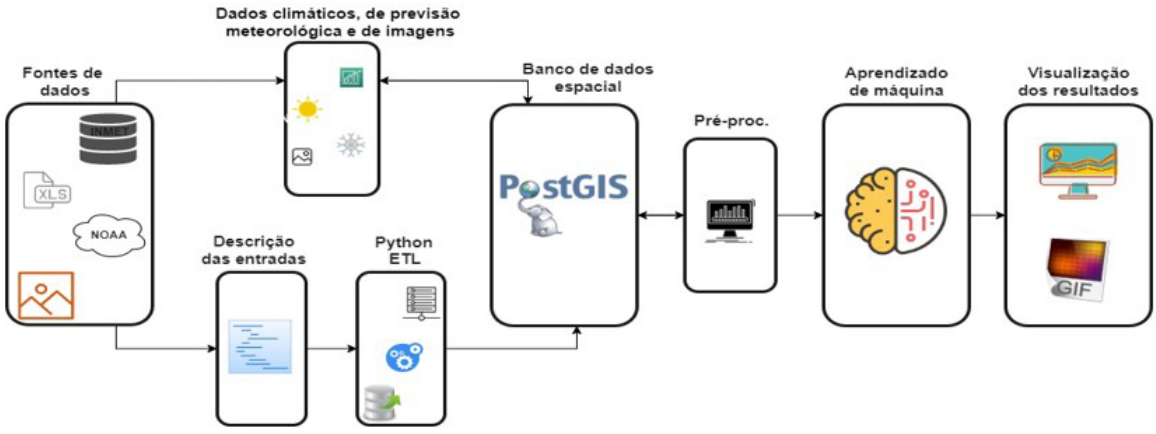


Figura 1. Arquitetura proposta para o TouceiraTech.

predição, são criados os mapas de vegetação, representando a variação do pasto para um determinado período e, também, uma GIF animada, ilustrando a variação temporal do NDVI. Detalhes sobre os módulos são apresentados em Soares (2021): coleta - tratando das fontes de dados, atualização periódica, metadados e processo Extract, Transform, Load (ETL); armazenamento - descrevendo o banco de dados espacial; processamento - explicando o pré-processamento e o modelo de predição; e visualização - detalhando as interfaces com gráficos e mapas de vegetação estáticos e animados.

Para o seu funcionamento, o TouceiraTech demanda apoio de áreas de referência, com séries de dados históricos de manejo da pastagem nativa associados a dados meteorológicos. Como estudo de caso, foram utilizados dois conjuntos de dados, oriundos de duas áreas experimentais da EMBRAPA Pecuária Sul, submetidas a pastejo contínuo com lotação variável, visando a uma oferta de forragem de 12%, para otimizar o ganho de peso. O primeiro conjunto de dados (A), assim como no trabalho de Schulte et al. (2019), tem origem nos experimentos desenvolvidos em quatro potreiros, com o intuito de avaliar a eficácia do Método Integrado de Recuperação de Pastagens (MIRAPASTO), para controle do capim-annoni em pastagens nativas (Neves et al., 2020). Os tratamentos foram: pastagem nativa submetida à recuperação da degradação pela infestação do capim-annoni (MIRAPASTO) e pastagem natural infestada pelo capim-annoni (Infestado), com duas repetições de área. O Conjunto A representa uma série de dados temporais de MF, correspondente ao período entre 2014 e 2020, obtidos pelo corte sistemático de seis amostras em cada data, bem como os dados de múltiplas medidas aleatórias de altura média, em uma área de 0,5 × 0,5 m^2, sendo três desses cortes realizados sob vegetação protegida por gaiola de exclusão de pastejo, e três outros cortes fora das gaiolas de exclusão, sob pastejo. Os cortes e medições foram obtidos em cada potreiro, com intervalos de, aproximadamente, 30 dias, pretendendo representar a MF média, disponível nos potreiros. A segunda série de dados, Conjunto B, foi obtida em um outro experimento, realizado em nove potreiros, com o objetivo de verificar o efeito de três níveis de intensificação pecuária, envolvendo a utilização de fertilização e da sobressemeadura de espécies hibernais, em pastagens nativas (Costa, 2019). Os tratamentos foram: Campo Nativo (CN), Campo Nativo Fertilizado (CNF) e Campo Nativo Melhorado (CNM), com três repetições de área cada. Esta série temporal contempla quatro períodos de um ano e coleta de oito amostras, sob o mesmo protocolo experimental do Conjunto A.

A operação do sistema inicia-se com o cadastro das áreas de interesse, caracterizadas como unidades de manejo de pastejo, denominadas potreiros, as quais podem estar subdivididas em áreas menores com diferentes perfis de acúmulo de forragem. O sistema permite tanto a definição de áreas de referência quanto de manejo de pasto (potreiro). Após cadastro, são inseridas no banco de dados informações sobre o pasto, os dados meteorológicos da estação meteorológica mais próxima da área, obtidos do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do INMET, e também os dados de previsão meteorológica. Para realizar as inserções das pastagens, o sistema utiliza um script Python, adaptado de Schulte et al. (2019), que lê automaticamente as planilhas correspondentes aos conjuntos A e B, armazenando os registros no banco de dados do sistema. Além disso, é realizado o cálculo da evapotranspiração, automatizado com auxílio de um pacote em Python chamado PyETo (https://github.com/woodcrafty/PyETo), sendo adotado o método de Penman-Monteith. Para os testes de predição, são considerados dois cenários: (i) predição para o presente, isto é, para a predição da MF de uma série temporal, tendo como base uma série histórica de dados meteorológicos reais como entrada no modelo, e (ii) predição para o futuro, ou seja, predição com base em dados de previsões meteorológicas. Para avaliar a acurácia de predição, apresenta-se o Root Mean Squared Error (RMSE) e o coeficiente de determinação (R^2), por meio de regressão linear. Parte dos principais resultados dos experimentos com o protótipo (Soares, 2021) é apresentada a seguir, com foco no módulo de predição, explorando diferentes tipos de treinamento – estratificação por potreiro (P), estratificação por tratamento (T) e não estratificado (N) – e nos mapas de visualização.

A Figura 2 ilustra graficamente a estimativa de MF ao longo do tempo a partir de três tipos de treinamento. Foram feitas 10 repetições para cada potreiro, utilizando todos os tipos de treinamento. Para constatar o melhor e o pior caso, foram verificados os RMSEs de cada tipo de treinamento em cada uma das repetições: o menor valor de RMSE obtido foi considerado o melhor caso, e o maior valor, o pior caso. Para o potreiro P21 MIRAPASTO (melhor caso), o RMSE médio foi de 975,12 kg/ha para o treinamento estratificado por potreiro; para o treinamento estratificado por tratamento, 1.627,19 kg/ha, e, para o treinamento não estratificado, 1.764,76 kg/ha. Para o potreiro P20 Infestado (pior caso), o RMSE médio para o treinamento estratificado por potreiro foi de 1.882,62 kg/

ha; para o treinamento estratificado por tratamento, 2.135,98 kg/ha, e, para o treinamento não estratificado, 1.644,51 kg/ha. No melhor caso (a), é possível verificar que a curva dos valores preditos, que manteve um comportamento mais próximo da curva dos valores reais, foi obtida com o treinamento estratificado por potreiro, obtendo o menor RMSE de 893,28 kg/ha. No pior caso (b), é possível verificar que a curva dos valores preditos que se manteve mais diferenciada da curva dos valores reais foi a do treinamento estratificado por tratamento, com o maior RMSE de 2.508,52 kg/ha.

A alteração no modelo, com foco na TA, foi inicialmente avaliada tanto para o Conjunto A como para o Conjunto B, apresentando como melhor caso o treinamento estratificado por tratamento. Para avaliar a capacidade de realizar o aprendizado através de fontes variadas de dados de pastagem, foi feita a união entre os conjuntos de dados A e B, aplicando-se o treinamento estratificado por tratamento, considerando as semelhanças dos tratamentos adotados nos dois experimentos que deram origem aos dois conjuntos de dados. Assim, para os tratamentos Infestado/CN, o conjunto total de amostras de treinamento foi de 186 amostras e, para os tratamentos MIRAPASTO/CNM e MIRAPASTO/CNF, foi de 180 amostras. Foram feitas 10 repetições utilizando o treinamento estratificado por tratamento (T), sendo que o menor RMSE foi considerado o melhor caso e o maior RMSE foi considerado o pior caso. Realizando-se os testes a partir da união Infestado/CN, foram obtidos o melhor e o pior caso para os potreiros que recebem ou tratamento Infestado ou tratamento CN.

Na Figura 3, é possível visualizar a correlação entre os valores reais e preditos, em que 3(a) apresenta a correlação para o potreiro P8 (melhor caso), observando-se um R^2 linear de 0,93 e um coeficiente angular de 1,13°, enquanto que para o P21 Infestado (pior caso), em 3(b) verifica-se um R^2 linear de 0,64 e um coeficiente angular de 1,24°.

A Figura 4(a) apresenta o mapa temático para o usuário, com a visualização dos resultados em cores, gerando alertas sobre o ajuste da carga animal. O alerta é representado pelo círculo nos limites inferior esquerdo (para os potreiros P20 Infestado e P21 Infestado) e direito (para os potreiros P20 MIRAPASTO e P21 MIRAPASTO). Caso o usuário clique no círculo, apresenta-se uma mensagem: verde - inserir animais na área; amarela - manter a quantidade de animais, e vermelha - retirar animais. A coloração do mapa é feita considerando o intervalo de [0, +150], recebendo a cor vermelha no caso de a TA ser mínima (0) e verde, caso seja máxima (150). A coloração do círcu-

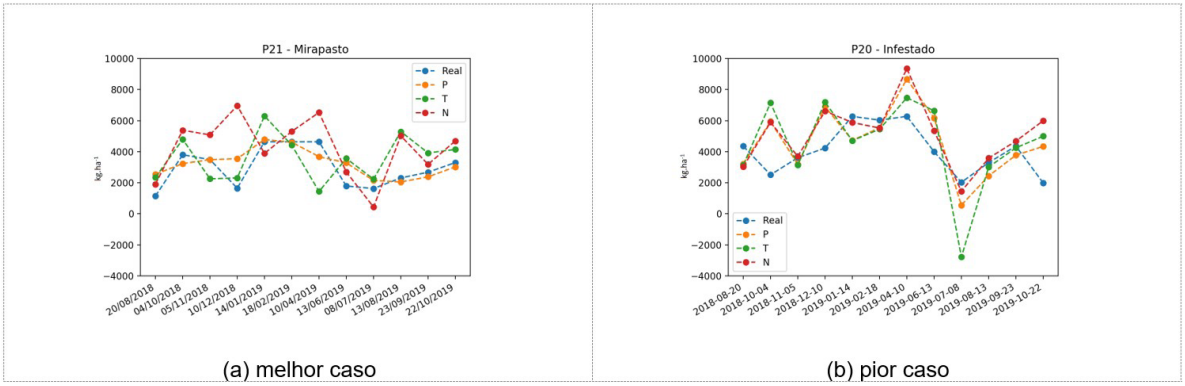


Figura 2. Valores reais versus preditos pela RNN LSTM da estimativa de MF por subárea.

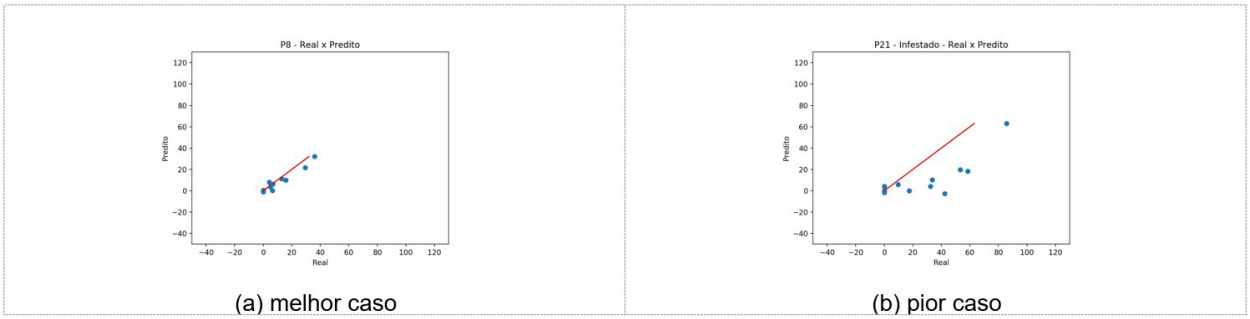


Figura 3. Valores reais e preditos de taxa de acúmulo.

Figura 4. Mapa temático com valores de taxa de acúmulo preditos para o futuro, utilizando dados históricos de pastagem (a) × NDVI (b), para cada subárea de estudo, do Conjunto A.

lo é definida pela soma entre a MF do mês anterior e a TA predita, resultando na cor verde, se for maior do que 12% da carga animal; vermelho, se for inferior, e amarela, se for igual. Nota-se que, para todos os potreiros, a soma se manteve superior à taxa de lotação ideal. Em contraste, a Figura 4(b) ilustra o resultado do modelo de predição para o futuro, utilizando valores de NDVI, com os mesmos parâmetros e método de criação.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O protótipo TouceiraTech aprimorou o modelo de predição de MF apresentado por Schulte et al. (2019). A automatização da coleta de dados meteorológicos relativos à área de interesse e a incorporação da previsão meteorológica e o uso de imagens satelitais permitiram, após pré-processamento, estimar com relativa acurácia a TA, parâmetro essencial para o manejo da pastagem. Os resultados obtidos com índices de vegetação via imagens de satélite indicam que o corte de forragem, para a estimativa de disponibilidade de pasto, poderá ser substituído num futuro próximo, com vantagens, melhorando a resolução espaçotemporal das estimativas. O modelo atual apresenta um elevado potencial de aplicação no âmbito da pecuária de precisão, capaz de evoluir para uma solução aplicável em pesquisas e no manejo comercial de pastagens por meio de processos de validação e transferência de tecnologia.

AGRADECIMENTOS

O trabalho foi realizado com suporte da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, tendo em vista o vínculo dos autores ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada (PPGCAP), resultado da cooperação entre UNIPAMPA e EMBRAPA, incluindo uma bolsa de mestrado e, em parte, subsidiado pelo Programa de Auxílio da Pós-Graduação (PAPG) da UNIPAMPA.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, C. M. S.; VALENTIM, J. F.; CAVALCANTE, F. A.; VALLE, L. A. R. **Padrões de desempenho e produtividade animal para recria-engorda de bovinos de corte no Acre**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2005. 32 p. (Embrapa Acre, Documentos, n. 98).

COSTA, J. L. B. **Níveis de intensificação em pastagem natural:** desempenho animal e produção vegetal. 2019. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

FERNANDES, H. J.; PAULINO, M. F.; MARTINS, R. G. R.; VALADARES FILHO, S. C.; TORRES, R. A.; PAIVA, L. M.; MORAES, G. F. B. K. Ganho de peso, conversão alimentar, ingestão diária de nutrientes e digestibilidade de garrotes não-castrados de três grupos genéticos em recria e terminação. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 33, p. 2403-2411, 2004.

KICHEL, A. N.; MIRANDA, C. H. B.; ZIMMER, A. H. Degradação de pastagens e produção de bovinos de corte com a integração agricultura x pecuária. In: SIMPÓSIO DE PRODUÇÃO DE GADO DE CORTE, 1., 1999, Viçosa - MG. **Anais** [...]. Viçosa: UFV, 1999. p. 201-234.

MACHADO, L. A. Z.; KICHEL, A. N. **Ajuste de lotação no manejo de pastagens**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2004. 55 p. (Embrapa Agropecuária Oeste, Documentos, n. 62).

MELADO, J. Pastagem ecológica e serviços ambientais da pecuária sustentável. **Revista de Política Agrícola**, v. *16*, n. 3, p. 113-118, 2007.

NEVES, M. C.; PEREZ, N. B.; LUIZ, A. J. B.; DEIBLER, A.; PINHO, L. B. Avaliação de sensor multiespectral em mapeamentos da infestação de pastagens naturais pelo capim-annoni. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19., Santos, 2020. **Anais** [...]. Santos: INPE, 2020. p. 1548-1551.

PEDREIRA, C. G. S. Avanços metodológicos na avaliação de pastagens. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 39., 2002, Recife. **Anais** [...]. Recife: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2002. p. 100-150.

SCHULTE, L. G. **Suporte a decisão em pastagens:** análise espaço-temporal e aprendizado de máquina para predição da disponibilidade de forragem no contexto de smart farming. 2019. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, RS.

SCHULTE, L. G.; PEREZ, N. B.; PINHO, L. B.; TRENTIN, G. **Sistema de Apoio à Decisão para Pecuária de Precisão:** módulo para ajuste de taxa de lotação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO, 15., 2019, Aracajú. **Anais** [...]. Porto Alegre: SBC, 2019. p. 95-102.

SILVEIRA, V. C. P.; VARGAS, A. F. D. C.; OLIVEIRA, J. O. R.; GOMES, K. E.; MOTTA, A. F. Qualidade da pastagem nativa obtida por diferentes métodos de amostragem e em diferentes solos na apa do Ibirapuitã, Brasil. **Ciência Rural**, v. *35*, n. 3, p. 582-588, 2005. DOI: http://doi.org/10.1590/S0103-84782005000300014.

SOARES, Â. F. **TouceiraTech:** um Farm Management Information System para pecuária de precisão baseado em predição com redes neurais recorrentes. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pampa, Bagé.

SOARES, Â. F.; PINHO, L. B.; PEREZ, N. B. TouceiraTech: uma proposta de FMIS inovador para predição de disponibilidade de pasto e ajuste de lotação animal. In: JORNADAS ARGENTINAS DE INFORMÁTICA E INVESTIGACIÓN OPERATIVA, 49; CONGRESO DE AGROINFORMÁTICA, 12, 2020, Buenos Aires. **Anales electrónicos** [...]. Buenos Aires: SADIO, 2020. p. 298-311.

Termografia infravermelha aplicada à pecuária de precisão

76

Infrared thermography applied to precision livestock farming

Alexandre Rossetto Garcia[1,2], Andréa do Nascimento Barreto[3], Mariana Jucá Moraes[4], Gabriela Novais Azevedo[5], Lívia Ferreira Pinho[6], Giovanna Galhardo Ramos[7], Alda Juliana Castro de Sousa[8]

[1] *Dr., Embrapa Pecuária Sudeste (CPPSE), São Carlos (SP), Brasil, alexandre.garcia@embrapa.br*
[2] *Dr., Universidade Federal do Pará (UFPA), Castanhal (PA), Brasil, alexandre.garcia@embrapa.br*
[3] *MSc., Universidade Federal do Pará (UFPA), Castanhal (PA), Brasil, andreadnb91@gmail.com*
[4] *BSc., Universidade Federal do Pará (UFPA), Castanhal (PA), Brasil, marianajmoraes15@gmail.com*
[5] *BSc., Centro Universitário Central Paulista (UNICEP), São Carlos (SP), Brasil, gabi.nazevedo@hotmail.com*
[6] *BSc., Universidade Federal do Pará (UFPA), Castanhal (PA), Brasil, liviapinho30@gmail.com*
[7] *BSc., Universidade de São Paulo (USP), Pirassununga (SP), Brasil, giiovannagalhardo@gmail.com*
[8] *BSc., Universidade Federal do Pará (UFPA), Castanhal (PA), Brasil, julianacastro2127@gmail.com*

RESUMO

Este capítulo visa mostrar fundamentos técnicos e científicos da termografia infravermelha (IRT) e suas principais aplicações na produção animal, com enfoque na espécie bovina. O uso da termografia infravermelha como ferramenta auxiliar no diagnóstico de afecções e seu emprego na avaliação da condição térmica dos animais é abordado. Detalhes sobre os fundamentos físicos da técnica são apresentados de modo simplificado, bem como os principais componentes de uma câmera térmica e o seu funcionamento. A compreensão sobre a adoção de máscaras térmicas para a interpretação visual instantânea de um termograma é facilitada pela apresentação de alguns tipos de paletas de cores. Diversas aplicações da termografia infravermelha para bovinos de corte e bovinos de leite são abordadas, de modo a exemplificar a utilidade da IRT no apoio a técnicos e a produtores rurais na tomada de decisões mais assertivas, visando melhorar os processos de avaliação dos animais e aumentar a eficiência dos sistemas de produção.

Palavras-chave: pecuária de precisão; termografia infravermelha; gado de corte; gado de leite; câmeras térmicas.

ABSTRACT

This chapter aims to show the technical and scientific basis of infrared thermography (IRT) and its main applications in livestock production, focusing on cattle. The use of IRT as an auxiliary tool in diagnosing disease and its use in evaluating the thermal condition of animals are discussed. Details of the physical principles of the technique are presented in simplified form, as well as the main components of a thermal imaging camera and how they work. Understanding the use of thermal masks for immediate visual interpretation of a thermogram is facilitated by showing some types of color palettes. Several applications of IRT for beef and dairy cattle are discussed to illustrate the usefulness of IRT in assisting technicians and rural producers to make more assertive decisions aimed at improving animal evaluation processes and increasing the efficiency of production systems.

Keywords: precision livestock farming; infrared thermography; beef cattle; dairy cattle; thermal cameras.

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias digitais têm contribuído expressivamente para o recente avanço da ciência animal, em virtude da necessidade crescente de acompanhamento do estado de saúde e de ambiência dos animais. Dentro do cenário de inovação no ambiente agrícola, as tecnologias de pecuária de precisão (PP ou PLF, do inglês *Precision Livestock Farming*) estão se tornando cada vez mais comuns na pecuária moderna e várias aplicações vêm sendo desenvolvidas e adotadas em diversos sistemas de produção no

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000066

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

Brasil. A pecuária de precisão tem como um de seus principais objetivos o uso de inovações tecnológicas para o monitoramento animal, visando aumentar a geração de informações e melhorar o gerenciamento dos sistemas de produção. Ao longo dos anos, esse conjunto de técnicas digitais tem sido usado para favorecer as interações entre humanos e animais, bem como para aumentar a produtividade e a sustentabilidade das fazendas (Vaintrub et al., 2021). O uso de técnicas acuradas e confiáveis para transpor os eventos do ambiente analógico para o digital é também necessário nos diversos campos de pesquisas científicas, o que inclui a Medicina Veterinária e a Zootecnia.

Dentre as tecnologias digitais disponíveis para uso em ciência animal, o uso da termografia infravermelha, também conhecida como IRT (do inglês *Infrared Thermography*), vem ganhando espaço, seja nas fazendas, seja na pesquisa cientifica. A termografia por infravermelho é uma técnica de aquisição e análise de informações térmicas a partir de imagens obtidas à distância, que opera na faixa da radiação infravermelha. É, portanto, uma técnica que permite avaliar a temperatura de superfície dos animais (Pantoja et al., 2017) e dos demais elementos do ambiente circundante sem que haja contato com o elemento a ser inspecionado. Essa característica é útil no diagnóstico e no acompanhamento do tratamento de determinadas enfermidades, além de possibilitar a identificação de ambientes desafiadores para os animais no tocante à condição térmica (McManus et al., 2016; Romanello et al., 2018).

2 A TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A termografia infravermelha é uma tecnologia sem contato e não destrutiva, usada para capturar e visualizar informações térmicas de objetos e ambientes. A IRT baseia-se nos princípios de detecção e mensuração da radiação infravermelha, a qual é a radiação eletromagnética emitida pelos objetos devido a sua temperatura. O princípio da IRT vale-se do fato de a transferência de calor por radiação térmica ocorrer em toda superfície acima do chamado "zero absoluto". O zero absoluto é o limite inferior de temperatura na natureza, que corresponde à menor temperatura possível de ser atingida, equivalente a -273,15 °C ou 0 Kelvin. Na ausência de meio isolante, transferência de calor por radiação ocorre entre duas superfícies que se encontram em temperaturas diferentes. Dessa forma, todos os corpos acima de zero grau Kelvin emitem radiação eletromagnética. Os raios infravermelhos, que são parte do espectro eletromagnético, geram a sensação de calor por meio de ondas invisíveis a olho nu. Essa energia emitida é detectada pelas câmeras termográficas e é convertida em sinais elétricos, o que torna possível a interpretação da temperatura de superfície de modo visual.

3 FUNDAMENTOS DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A radiação infravermelha foi descoberta em 1800 pelo astrônomo Sir Frederick William Herschel. Porém, sua aplicação prática ocorreu somente durante a Segunda Guerra Mundial, quando a primeira câmera infravermelha eletrônica foi desenvolvida e utilizada em tanques alemães. Grandes e pesadas, eram equipamentos destinados a ampliar a capacidade humana de visão noturna (Luzi et al., 2013). Essas câmeras também foram utilizadas como instrumentos de alta sensibilidade na formação de imagens térmicas, captando radiação fora do espectro visível durante voos noturnos de aviões espiões. Seu uso tinha como objetivo fotografar alvos inimigos captando imagens térmicas, sendo as informações obtidas por meio dessas fotografias usadas na elaboração de estratégias militares (Rogalski, 2011). Posteriormente, o uso das câmeras infravermelhas foi adotado em pesquisas preventivas na área de saúde humana (Ring; Ammer, 2012) e, com base em aprimoramentos técnicos, tornou-se também utilizável na Medicina Veterinária.

As câmeras térmicas infravermelhas também são conhecidas como termocâmeras ou termógrafos: equipamentos que capturam a energia infravermelha emitida por um corpo e, com base na sua emissividade, são capazes de indicar a temperatura de superfície do mesmo. Imaginemos, como exemplo, a avaliação termográfica de um membro anterior de um cavalo. O membro do animal radia uma onda eletromagnética na faixa de frequência do infravermelho, que se propaga pela atmosfera. A imagem térmica do membro é enquadrada por lentes e converge para um detector formado por diversos sensores infravermelhos. A irradiação recebida pelo termovisor é amplificada e convertida em um sinal condicionado para o processamento eletrônico. Cálculos são efetuados para se correlacionar a irradiação recebida com a temperatura do objeto, determinada por meio de um algoritmo de cálculo que considera a lei de Planck. Na sequência, a imagem térmica é construída em uma matriz de pontos (pixels), cuja resolução depende do número de pixels. Ou seja, quanto maior o número de pixels, melhor a resolução da imagem gerada pelo operador. Dessa forma, simplificadamente, a imagem térmica da região anatômica de interesse é instantaneamente disponibilizada em uma tela e pode ser gravada em formato de arquivo digital. Em benefício da

ciência animal, a evolução tecnológica permitiu que as câmeras termográficas pudessem ser miniaturizadas e se transformassem em equipamentos portáteis. Isso tem facilitado sobremaneira o uso dos termovisores em ambientes hospitalares, em clínicas veterinárias, centros de diagnóstico, bem como em instalações de fazendas, como estábulos, salas de ordenha e confinamentos.

A termografia infravermelha permite a investigação de diferentes aspectos da fisiologia térmica dos animais. Além de auxiliar no diagnóstico de lesões e enfermidades em uma abordagem individualizada e mais específica, a técnica pode ser eficaz para aplicações populacionais, como na localização e contagem de animais ou na determinação da condição térmica de um rebanho. A grande vantagem do uso da IRT na pesquisa e nas rotinas de campo consiste no fato de as medições poderem ser feitas sem tocar ou perturbar o animal e, dependendo do tipo de instrumento e aplicação, essas medições podem ser realizadas a curtas (< 1 m) ou grandes distâncias (> 1000 m) (McCafferty, 2007). Essa característica faz da IRT um método que não exige contato físico direto com a superfície monitorada, permitindo a leitura remota da distribuição de temperatura. Um exemplo de uso a curta distância são as imagens termográficas parciais da cabeça de bovinos com globo ocular em primeiro plano (Figura 1), abordagem útil para a estimativa da condição térmica instantânea do animal.

4 BASE FÍSICA DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

O espectro eletromagnético abrange uma ampla gama de ondas, incluindo luz visível, luz ultravioleta e radiação infravermelha. A radiação infravermelha é caracterizada por comprimentos de onda maiores que os da luz visível, normalmente variando de cerca de 0,7 a 1.000 micrômetros (µm). Desse modo, a base física da termografia infravermelha reside no fato de que todos os objetos emitem radiação térmica e de que a intensidade e a distribuição espectral dessa radiação dependem da temperatura do objeto. De acordo com a lei da radiação do corpo negro de Planck, objetos mais quentes emitem radiação mais intensa em comprimentos de onda mais curtos dentro do espectro infravermelho.

A faixa de radiação infravermelha é dividida em diferentes regiões:

1) Infravermelho próximo (NIR): O NIR é uma região que varia de aproximadamente 0,7 µm a 1,4 µm e está mais próxima da luz visível. É frequentemente usado em aplicações como controles remotos e fibra óptica.
2) Infravermelho de ondas curtas (SWIR): O SWIR é uma região que se estende de 1,4 µm a 3 µm e possui diversas aplicações em espectroscopia e imagem.
3) Infravermelho de ondas médias (MWIR): O MWIR abrange a faixa de 3 µm a 8 µm e é comumente usado em aplicações como sistemas militares de imagem térmica.
4) Infravermelho de ondas longas (LWIR): O LWIR abrange de aproximadamente 8 µm a 15 µm e é a principal região de interesse para a maioria dos dispositivos e câmeras de imagem térmica de aplicação civil.

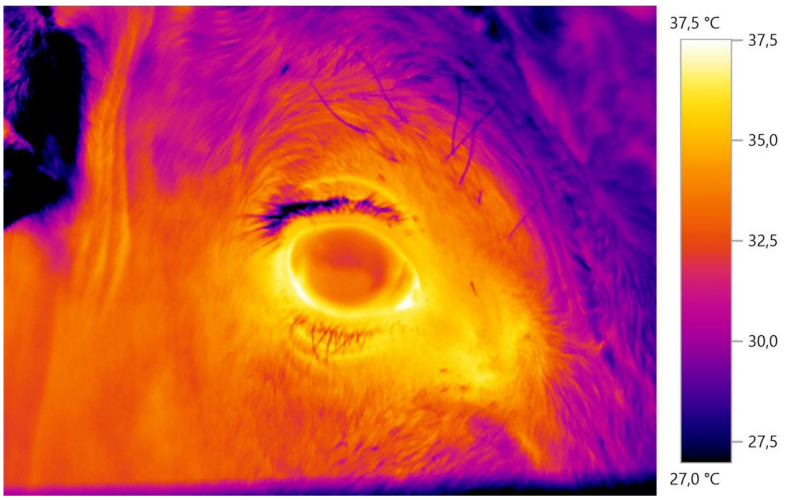


Figura 1. Imagem termográfica do globo ocular de bovino. Termograma parametrizado para a paleta de cores ferro e escala térmica de 27,0 oC a 37,5 oC.

5 FUNCIONAMENTO DE UMA CÂMERA TÉRMICA

As câmeras térmicas infravermelhas são equipamentos capazes de detectar e capturar a radiação infravermelha emitida pelos objetos. Aa câmera térmica converte a radiação detectada em sinais elétricos e os processa em uma imagem visível. A imagem gerada apresenta as variações de temperatura dos objetos em cena. Essa propriedade permite aos usuários detectar anomalias, fontes de calor ou gradientes de temperatura no ambiente ou no objeto observado.

Os principais componentes de uma câmera térmica infravermelha e seu modo de funcionamento são:

a) Sensor infravermelho: O sensor ou detector infravermelho é a parte mais importante de uma câmera térmica infravermelha. Existem vários tipos de detectores, mas um tipo comum é o microbolômetro. Os microbolômetros consistem em um conjunto de minúsculos sensores térmicos que absorvem e medem o calor (radiação infravermelha) dos objetos no campo de visão da câmera.
b) Lente: As câmeras infravermelhas possuem um sistema de lentes para focar a radiação infravermelha recebida no conjunto de detectores.
c) Processamento de imagem: A radiação infravermelha detectada é convertida em sinais elétricos pelo conjunto de microbolômetros. Esses sinais são então processados para criar uma imagem, de modo que cada pixel na imagem corresponde a uma leitura de temperatura realizada pelo conjunto de microbolômetros. É como se cada pixel funcionasse como um termômetro individualmente, o que faz com que uma imagem térmica possua tanto mais avaliações de temperaturas quanto maior for a sua resolução.
d) Mapeamento de cores: Para tornar a imagem interpretável e visualmente compreensível, a câmera atribui cores a diferentes valores de temperatura. Esse processo é feito usando-se uma paleta ou escala de cores, disponível nos softwares da própria câmera ou em programas de interpretação de imagens térmicas. As paletas de cores mais intuitivas são aquelas em que as temperaturas mais altas são representadas por cores quentes (por exemplo, vermelho e amarelo) e as temperaturas mais baixas são representadas por cores frias (por exemplo, azul e verde). Porém, há diversos tipos diferentes de paletas de cores à escolha do termografista. (ver box “Paletas de cores”).
e) Exibição: A imagem térmica resultante é exibida na tela da câmera, permitindo aos usuários visualizar e discriminar as diferenças de temperatura na imagem ou na região de interesse.

BOX 1: O QUE É UM MICROBOLÔMETRO?

O microbolômetro é um componente-chave em dispositivos de imagem infravermelha, como câmeras térmicas. Em geral, é produzido a partir de materiais como óxido de vanádio ou silício amorfo. O microbolômetro é um tipo de detector térmico usado para converter a radiação infravermelha emitida por objetos em sinais elétricos, os quais podem ser processados para criar imagens térmicas. Os microbolômetros são conhecidos por seu tamanho compacto, confiabilidade e economia, características que os tornam amplamente utilizados em diversas aplicações, incluindo segurança e vigilância, sistemas automotivos de visão noturna e imagens médicas.

Funcionamento de um microbolômetro e seus principais recursos:

1. Princípio de detecção: Os microbolômetros operam com base na mudança da resistência elétrica em resposta a variações de temperatura. Eles consistem em um conjunto de minúsculos resistores termicamente sensíveis, cada um posicionado em um local de pixel.

2. Absorção de radiação infravermelha: Quando a radiação infravermelha de um objeto atinge a superfície do microbolômetro, ela faz com que a temperatura do resistor mude. A quantidade de mudança de temperatura é proporcional à intensidade da radiação infravermelha recebida.

3. Mudança na resistência elétrica: À medida que a temperatura do resistor muda, sua resistência elétrica também muda. Essa mudança na resistência é medida e convertida em sinal elétrico pelo microbolômetro.

4. Matriz de pixels: Os microbolômetros são compostos por um grande arranjo desses pixels termicamente sensíveis. Cada pixel detecta independentemente a temperatura da parte correspondente da imagem que está sendo visualizada.

5. Leitura e processamento: Os sinais elétricos do conjunto de microbolômetros são lidos e processados por um software embarcado no dispositivo de imagem térmica. Esses sinais são então usados para criar uma imagem térmica, com o sinal de cada pixel representando a temperatura naquele local específico do sensor.

Os principais recursos e vantagens dos microbolômetros incluem:

- Operação não refrigerada: Ao contrário de alguns outros detectores infravermelhos, os microbolômetros não requerem refrigeração criogênica, a temperaturas extremamente baixas. Eles podem operar em faixa de temperatura próxima à temperatura ambiente, o que simplifica o design do dispositivo e reduz o consumo de energia.

- Tamanho compacto: Os microbolômetros são relativamente pequenos e podem ser integrados em dispositivos de imagem térmica compactos e leves, o que permite a portabilidade das termocâmeras.

- Economicidade: O processo de fabricação dos microbolômetros tornou-se mais econômico ao longo do tempo, resultando em produtos de imagem térmica com custos acessíveis para diversas aplicações.

- Confiabilidade: Os microbolômetros são sensores conhecidos por sua estabilidade e confiabilidade a longo prazo.

- Ampla faixa espectral: Dependendo do material utilizado, os microbolômetros podem ser projetados para detectar uma ampla faixa de comprimentos de onda no espectro infravermelho, o que os torna versáteis para diferentes aplicações.

BOX 2: PALETAS DE CORES

As paletas de cores usadas em termografia infravermelha são essenciais para a interpretação das imagens térmicas, pois atribuem cores diferentes às variações de temperatura, tornando os dados mais visíveis e compreensíveis.

Diferentes situações podem exigir a escolha de paletas de cores específicas para a interpretação das imagens térmicas. Em aplicações médicas pode ser preferível usar paletas que realcem sutilmente as diferenças de temperatura para diagnósticos precisos, enquanto em inspeções industriais, paletas que enfatizem rapidamente as áreas quentes ou frias podem ser mais apropriadas. A escolha da paleta de cores depende, portanto, do contexto e das preferências do usuário.

Alguns exemplos de paletas de cores comumente usadas em termografia infravermelha:

- Paleta arco-íris: É uma das paletas mais comuns e mais amplamente usadas na termografia. A imagem térmica é representada por uma escala de cores que segue as cores do arco-íris, começando com azul (para temperaturas mais baixas) e passando por verde, amarelo, laranja e vermelho (para temperaturas mais altas).

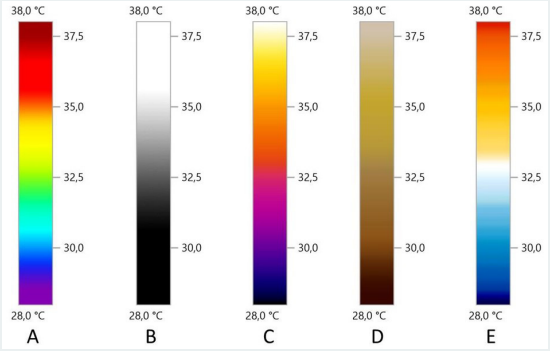
- Paleta ferro: Também é uma paleta popular devido à sua facilidade de interpretação. Representa a temperatura com cores que lembram as cores de uma barra de ferro aquecendo, começando com preto ou azul escuro (para temperaturas mais baixas), passando por tons de vermelho, amarelo e branco (para temperaturas mais altas).

- Paleta em escala de cinza: Usa diferentes tons de cinza para representar a temperatura. Geralmente começa com preto ou preto-azulado (para temperaturas mais baixas) e progride até tons mais claros de cinza e branco (para temperaturas mais altas).

- Paleta arco-íris invertido: É semelhante à paleta de cores arco-íris, mas com as cores invertidas. Começa com vermelho (para temperaturas mais baixas) e progride até azul (para temperaturas mais altas).

- Paleta de cores pseudocor: Usa cores variadas e não necessariamente segue uma ordem específica, tornando-a adequada para situações em que a ênfase é na diferenciação de temperatura em vez de em uma representação precisa.

- Paleta de cores personalizadas: Alguns sistemas de termografia permitem que os usuários personalizem suas próprias paletas de cores. Isso pode ser útil para adaptar a representação de temperatura de acordo com as necessidades específicas de um aplicativo.



Exemplos de paletas de cores mais comumente usadas na interpretação de termogramas: (A) paleta arco-íris, (B) paleta monocromática em escala de cinza, (C) paleta ferro, (D) paleta sépia, (E) paleta azul-vermelho. Paletas parametrizadas para a escala térmica de 28,0 °C a 38,0 °C.

6 USO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA NA MEDICINA VETERINÁRIA

A termografia infravermelha é uma ferramenta valiosa que possui diversas aplicações na Medicina Veterinária. Ela permite avaliar de forma não invasiva a saúde e o bem-estar dos animais ao possibilitar a mensuração instantânea da temperatura corpórea ou da temperatura de regiões específicas do corpo do animal a fim de detectar anormalidades ou problemas potenciais. A termografia por infravermelho permite avaliar um animal imóvel ou em movimento, bem como avaliar animais de forma individual ou simultaneamente com precisão, repetibilidade e confiabilidade. Porém, a termografia não depende apenas da temperatura do animal, mas também da sua emissividade e condutividade (Soerensen et al., 2014), o que pode ocasionar algumas limitações quanto ao uso da técnica (Zhang et al., 2020).

Uma das possibilidades de uso da IRT é sua capacidade de relacionar as mudanças na temperatura da superfície aos estados fisiológicos particulares ou associados a certos comportamentos dos animais, como o aconchego ou a vocalização. Na última década, diversos trabalhos com uso da termografia infravermelha foram desenvolvidos na área veterinária, como uma ferramenta para se obter uma avaliação precisa da condição térmica do animal (Moura et al., 2011) e de certas respostas térmicas que podem ser avaliadas em desafios dinâmicos, visando determinar a funcionalidade de um órgão, região corporal ou sistema. Alguns estudos realizados mostraram que a IRT é capaz também de detectar não apenas as mudanças na temperatura da superfície em resposta a atividade física mas também ao medo ou ao estresse (Herborn et al., 2018). A termografia vem sendo utilizada em diversas espécies animais de produção, como ovinos (Castanheira et al., 2010; McManus et al., 2015), bovinos (Pezeshki et al., 2011), equinos (Fenner et al., 2016) e bubalinos (Barros et al., 2016). Contudo, seu uso não tem se limitado aos estudos com mamífe-

ros, de modo que a técnica tem sido aplicada também para avaliação de insetos, répteis e pássaros (McCafferty et al., 1998).

Ao longo dos anos, o uso da termografia no monitoramento animal foi ampliado, com aplicações no diagnóstico de mastite (Colak et al., 2008; Zaninelli et al., 2018), identificação do estresse térmico (Herborn et al., 2015; Silva et al., 2017), na reprodução (Menegassi et al., 2016; Kahwage et al., 2017), no monitoramento de neonatos (Sousa et al., 2022) e até mesmo na avaliação da emissão de metano (Montanholi et al., 2008). Ainda, estudos relataram a utilidade de uso da IRT na avaliação da extensão e duração de processos inflamatórios observados após a marcação, nos efeitos da descorna, nas alterações de estado térmico dos animais durante o transporte, na detecção de distúrbios podais e na hipertermia corpórea devido a infecções.

Uma das limitações para a adoção da termografia infravermelha como técnica de apoio diagnóstico reside no fato de que seu uso requer equipamento especializado para geração de imagem térmica, além de pessoal treinado para realizar a interpretação das imagens térmicas com precisão. Porém, quando utilizada juntamente a outras ferramentas de diagnóstico e exames clínicos, a IRT melhora a qualidade geral dos cuidados veterinários, aprimora o monitoramento zootécnico e contribui para o bem-estar dos animais em vários ambientes.

A IRT permite mensurar de forma instantânea a temperatura da superfície do corpo do animal sem que haja contato físico ou necessidade de contenção física, a depender do tipo de avaliação. Isso torna o procedimento menos estressante para o animal. Elevação na temperatura corporal pode indicar hipertermia sistêmica, dificuldade de termorregulação corpórea ou condição febril. Condições de hipotermia generalizada também podem ser detectadas pela termografia infravermelha. Todos esses casos podem estar associados a um problema de saúde subjacente.

Além disso, a termografia infravermelha pode também ser usada para identificar variações de temperatura em áreas específicas do corpo do animal. Esse procedimento é particularmente útil para identificar processos inflamatórios, como nas articulações, músculos ou cascos. A condição de hipotermia local também pode ser detectada pela termografia infravermelha.

A IRT encontra aplicabilidade na detecção de lesões específicas como: a) Lesões músculo-esqueléticas: afecções como distensões musculares, lesões em tendões, lesões ligamentares e inflamação das articulações geralmente resultam em variações localizadas de temperatura, que podem ser detectadas por meio de imagens térmicas; b) Claudicação: a câmera infravermelha pode identificar diferenças de calor entre membros saudáveis e lesionados, o que pode ser de grande valia para identificar a origem da claudicação; c) problemas dentários: Problemas dentários, como abscessos dentários ou fraturas dentárias, podem causar alterações localizadas de temperatura que são visíveis por meio de imagens térmicas.

O monitoramento usual de animais com a IRT pode permitir a detecção precoce de problemas de saúde. Um bom exemplo é o uso da técnica na indústria equestre, onde é amplamente utilizada para monitorar cavalos de corrida e cavalos de desempenho. O uso regular da termografia em cavalos atletas pode ajudar a detectar sinais precoces de lesão ou inflamação, permitindo intervenção imediata e práticas preventivas. Outro uso rotineiro de interesse é no monitoramento da saúde de animais de produção, como bovinos, bubalinos, ovinos, caprinos e suínos. A IRT pode auxiliar na identificação de animais com temperatura corporal mais elevada, indicando problemas infecciosos ou condição de estresse térmico.

Um uso ainda exploratório da IRT, mas de grande interesse, é a identificação dos padrões de calor e alterações no fluxo sanguíneo para os órgãos reprodutivos. Essa aplicação, estudada com maior interesse em bovinos de leite e em suínos, pode ser útil em programas de reprodução, a fim de identificar as diferentes fases do ciclo estral das matrizes, na tentativa de maximizar sua fertilidade. Uma vez que a temperatura corporal elevada pode ser um sinal de estresse nos animais, a avaliação termográfica pode ser usada para avaliar os níveis de estresse durante o transporte, o manejo ou mesmo no interior dos sistemas de produção, sejam os animais criados estabulados ou a pasto.

O uso da IRT na vigilância da saúde de animais em cativeiro também é importante, especialmente para animais ou espécies que podem não apresentar sinais clínicos evidentes. Pode ajudar na detecção precoce de doenças e melhorar o bem-estar geral dos animais. Por fim, a IRT pode ser usada no monitoramento de surtos de doenças, desempenhando papel importante na biossegurança, o que pode ser crucial na prevenção da propagação de doenças nas populações animais, bem como de zoonoses, ou seja, de doenças intercambiáveis entre o ser humano e espécies animais.

6.1 Aplicação da termografia infravermelha na pecuária leiteira

Uma das aplicações de interesse da IRT na produção de bovinos leiteiros se relaciona à manutenção da saúde do aparelho locomotor, principalmente da região podal, pois as afecções de casco são responsá-

veis por aproximadamente 60% das causas de claudicação em vacas de leite. Imagens termográficas da banda coronária dos cascos podem ser usadas em avaliação comparativa ou individualizada para detectar alterações de temperatura e eventuais processos inflamatórios (Nikkah et al., 2005). Ainda, trabalhos apontam que a temperatura máxima dos cascos, em abordagem anterior, posterior ou lateral, é significativamente maior que a de cascos não afetados por processo inflamatório (Chiu; Hsu, 2022).

As vacas leiteiras são animais muito sensíveis a alta temperatura do ar e apresentam uma diminuição na produção devido à redução na ingestão de matéria seca consequente ao estresse térmico. Além isso, o estresse pelo calor determina perdas reprodutivas que reduzem o potencial econômico das granjas produtoras de leite. Por isso, a IRT tem sido considerada ferramenta de interesse para estudar não somente o efeito do estresse térmico em vacas leiteiras, mas também para avaliar estratégias de arrefecimento dos animais. Vacas holandesas sob estresse calórico foram aspergidas e submetidas a um fluxo de ventilação forçada (3m/s), durante 45 minutos, condição na qual a temperatura retal foi reduzida em 1,0 °C (Flamenbaum et al., 1986). Nesse sentido, a temperatura de superfície das vacas de leite pode ser monitorada por IRT tanto em galpões de manejo (Knizkova et al., 2007) como a campo, desde que sejam consideradas as condições ótimas para a aquisição das imagens térmicas.

Aplicação de grande interesse é a detecção da resposta inflamatória da glândula mamária (Figura 2), associada a um aumento inicial na temperatura da porção afetada do úbere. Sendo a IRT um método diagnóstico não invasivo e cujas medições precisas podem ser realizadas com rapidez, a técnica permite inferências entre a temperatura da superfície e o estado de saúde da glândula mamária (Tommasoni et al., 2023). Com a crescente preocupação com a resistência antimicrobiana, é fortemente recomendado que apenas as glândulas mamárias que apresentem infecção sejam tratadas, o que requer um método diagnóstico precoce e preciso. Contudo, estudos em ovinos e bovinos têm demonstrado que o monitoramento da temperatura de superfície do úbere deve considerar sua aplicação em ambiente de temperatura do ar controlado ou, no mínimo, se combinado ao monitoramento da temperatura ambiental. Para ovinos, o uso de salas com climatização controlada para avaliação dos animais é mais simples, dado o porte dos animais. De qualquer modo, protocolos mais específicos e que considerem os fatores microclimáticos do local de avaliação do animal devem ser desenvolvidos para orientar o uso da IRT no diagnóstico da mastite subclínica diretamente nas propriedades rurais (Digiovani et al., 2016; Machado et al., 2021).

Outra aplicação veterinária relevante para a pecuária leiteira é o estudo de detecção de estro em vacas a partir das temperaturas de superfície avaliáveis de modo prático. Um estudo pioneiro, realizado a partir da avaliação da temperatura da região posterior das vacas mostrou que a IRT foi capaz de detectar o estro em estágios iniciais, mas foi menos preciso no pós-parto, devido a um maior número de falso-positivos (Hurnik et al., 1984). Também foi demonstrado que a IRT é capaz de mostrar alterações significativas na temperatura de superfície de matrizes bovinas

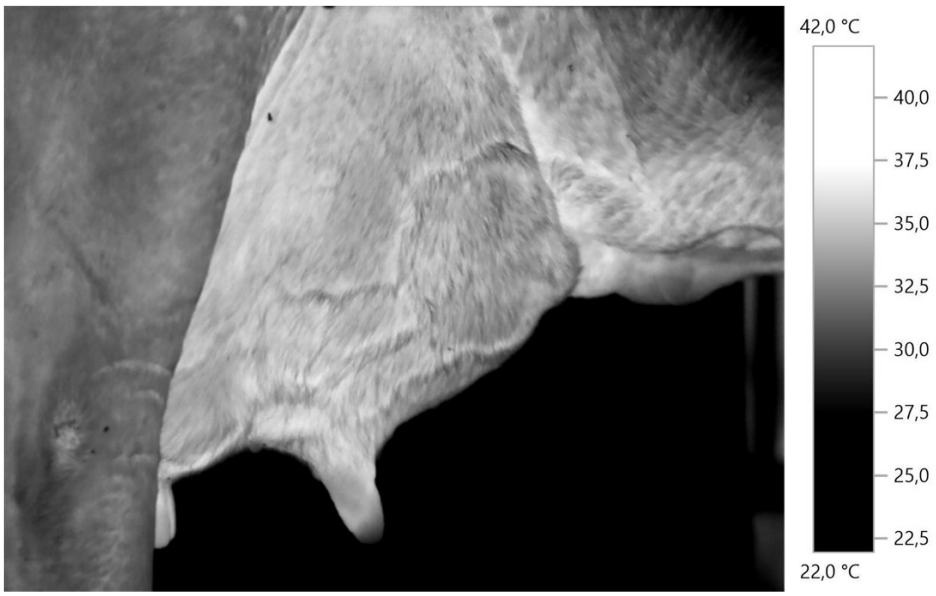


Figura 2. Imagem termográfica de úbere de vaca leiteira adulta momentos antes da ordenha. Termograma parametrizado para a paleta de cores monocromática preto-branco e escala térmica de 22,0 oC a 42,0 oC.

conforme o avançar da gestação, além de diferenças de temperatura entre vacas gestantes e não gestantes (Deak et al., 2019). Contudo, o grande interesse ainda permanece na determinação de possíveis alterações de temperatura detectáveis no início da fase estral para predição do momento da ovulação. Essa característica, se confirmada, permitiria automatizar a detecção do estro a partir da análise de imagens com inteligência artificial, com base em termogramas gerados a partir da visitação das vacas à sala de ordenha. Apesar de alguns resultados animadores (Perez Marquez et al., 2019; Vicentini et al., 2020), esse desafio ainda parece distante de ser superado.

6.2 Aplicação da termografia infravermelha na pecuária de corte

Métodos não destrutivos e não invasivos podem ser úteis para obtenção de dados confiáveis sem interferir diretamente nos indivíduos avaliados. A IRT é uma ferramenta com grande potencial para mensurar as condições de estresse térmico animal (Paim et al., 2014), pois permite o mapeamento da temperatura de superfície de diversas áreas corpóreas (Luzi et al., 2013). A IRT pode ser usada experimentalmente em testes controlados de resistência ao calor, bem como diretamente a campo, nos sistemas de produção. Pode ser usada como ferramenta auxiliar na caracterização do estresse térmico animal, associada a avaliação de parâmetros fisiológicos vitais (Romanello et al., 2018) e/ou comportamentais, ou em determinada condição de manejo e, ainda, ser utilizada para avaliar o conforto térmico de instalações.

A IRT tem sido considerada ferramenta de interesse para avaliar estratégias de mitigação do calor ambiente sobre os animais. Em condição de maior escala, o uso de câmeras termográficas embarcadas em aviões mostrou-se muito útil para mapear áreas extensas de pastagens tropicais. O sensoriamento distal por IRT em sobrevoos tripulados apresenta alta correlação linear ($r = 0,72$; $P = 0,0287$ até $r = 0,89$; $P = 0,0013$) com os registros de temperaturas obtidas em estações meteorológicas automáticas instaladas em sistemas de produção a pasto. Por isso, a IRT permite identificar com precisão as diferenças térmicas entre pastagens em monocultura e em sistemas silvipastoris, com definição de ilhas de calor nos primeiros e zonas de conforto térmico naqueles com presença de árvores (Garcia et al., 2023). Essa característica da IRT fornece uma nova aplicação para avaliações microclimáticas na pecuária que pode auxiliar o produtor nas tomadas de decisão de manejo ambiental e do rebanho visando aumentar o bem-estar de bovinos de corte criados a pasto.

Para sensoriamento proximal, a IRT pode ser usada na avaliação da temperatura de superfície de diferentes regiões do corpo. Nos bovinos, a temperatura máxima da região do globo ocular é observada próxima da carúncula lacrimal (Stewart et al., 2008) e apresenta correlação positiva ($r = 0,392$; $P < 0,05$) com a temperatura interna corpórea (Giro et al., 2019). A IRT é capaz de mostrar que bovinos de corte criados em pastagens arborizadas apresentam temperatura de superfície da região dorsal mais baixa do que animais criados em pastagens a pleno sol ($31,9 \pm 0,2$ vs $32,8 \pm 0,2$ °C, $P < 0,05$). A utilização da sombra atua diretamente no bem-estar animal, reduzindo o principal fator causador de estresse calórico em bovinos criados a pasto, que é a radiação solar (Garcia et al., 2023; Romanello et al., 2023). Por isso, a temperatura de superfície da pele de um animal criado a campo também é um atributo fisiológico de interesse a ser monitorado porque, conforme a teoria dos escudos concêntricos de calor, o fluxo para dissipação de energia térmica do núcleo corpóreo para o meio externo só ocorre quando a temperatura da superfície corpórea é menor que a temperatura do core (Mitchell, 2013). A termografia de bovinos criados a pasto (Figura 3) tem mostrado diferenças expressivas na temperatura de superfície de animais mantidos em sistemas silvipastoris ou em pastagens convencionais com pouca disponibilidade de sombreamento natural.

Um dos primeiros trabalhos com IRT na avaliação andrológica de touros bovinos usou a técnica para diagnóstico de processos inflamatórios nos órgãos sexuais de reprodutores e teve como objetivo principal a obtenção de um termograma global das gônadas de animais com fertilidade normal e com fertilidade alterada (Kozumplik et al., 1989). Desde então, considerou-se possível o uso da IRT para o diagnóstico de afecções dos órgãos sexuais acompanhadas de mudanças locais de temperatura, que podem afetar diretamente a qualidade do sêmen e a produção espermática.

A termorregulação escrotal para manutenção da temperatura testicular entre 4 ºC e 6 ºC abaixo da temperatura interna corpórea é de extrema importância para garantir a normalidade da espermatogênese e um pré-requisito para produção de sêmen com qualidade (Garcia, 2017). Por isso, a IRT é uma ferramenta auxiliar de grande importância na avaliação dos efeitos do estresse calórico nos parâmetros reprodutivos de touros (Menegassi et al., 2015). Os ruminantes apresentam gradiente de temperatura escrotal decrescente do funículo espermático à cauda do epidídimo (Coulter et al., 1988; Silva et al., 2017; Moura et al., 2019). Esse gradiente de temperatura no escroto e nos testículos aumenta quanto mais distan-

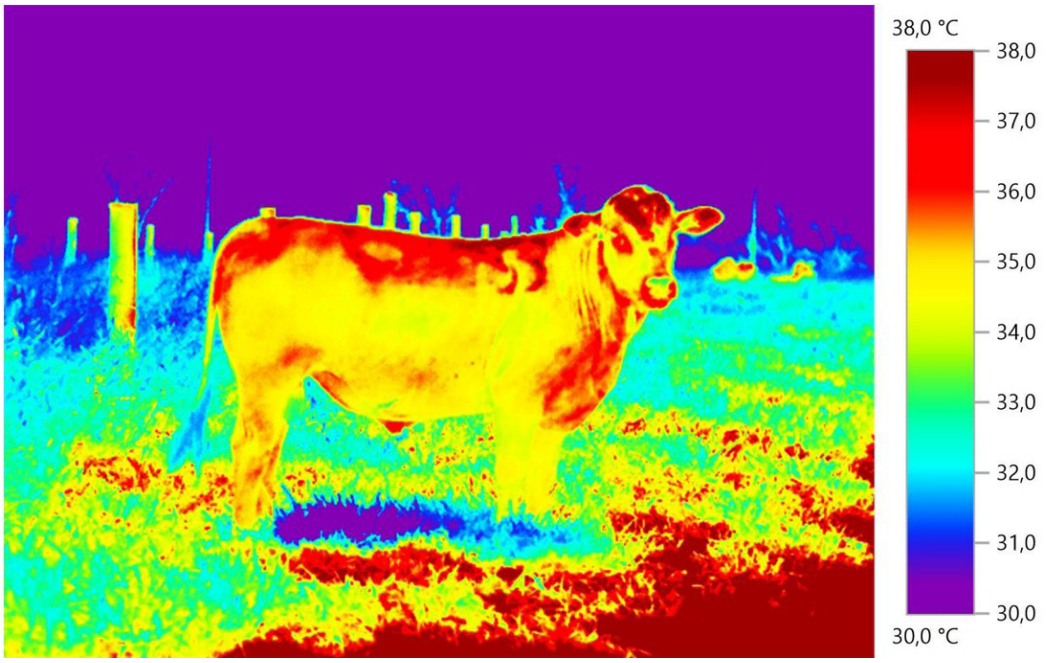


Figura 3. Imagem termográfica do antímero direito de bovino da raça Canchim em sistema de produção a pasto sem sombreamento natural. Termograma parametrizado para a paleta de cores arco-íris e escala térmica de 30,0 oC a 38,0 oC.

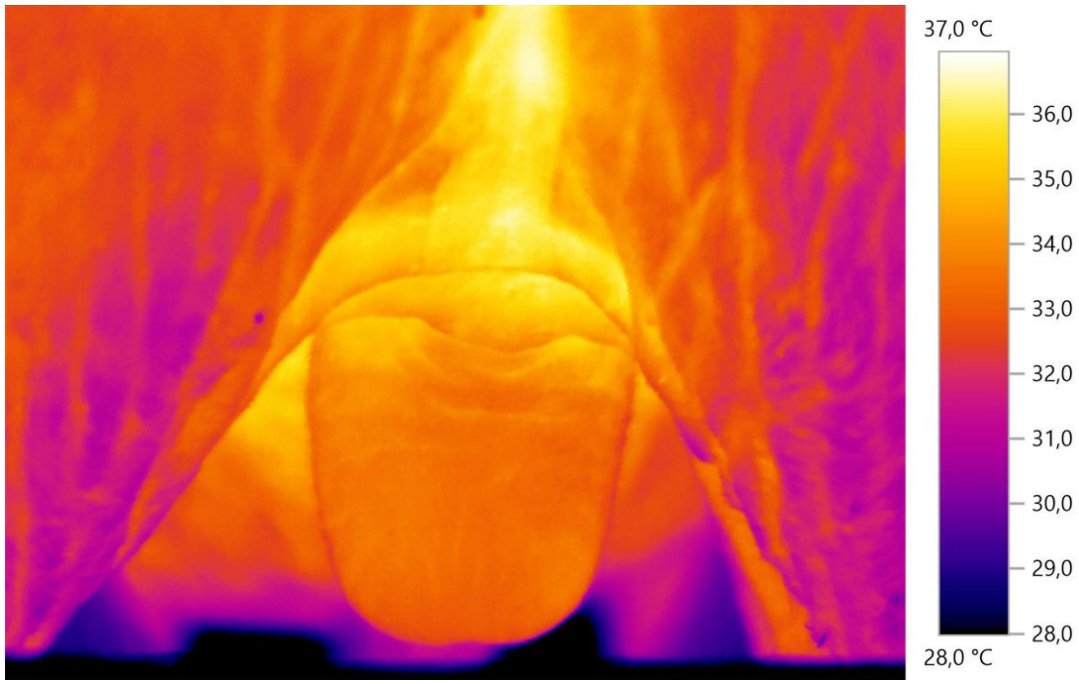


Figura 4. Imagem termográfica do escroto de touro bovino jovem – 9 meses de idade. Termograma parametrizado para a paleta de cores ferro e escala térmica de 28,0 oC a 37,0 oC.

te estiver a estrutura relativamente à cavidade abdominal (Figura 4). Por exemplo, a temperatura média da superfície escrotal de touros taurinos e compostos é de 30,4 °C no polo dorsal e de 28,8 °C no polo ventral (Kastelic et al., 1995). Dessa forma, o uso da termografia tem revelado particularidades térmicas de diferentes segmentos do escroto, importantes para o entendimento das trocas térmicas de animais de diferentes idades, genótipos e condições clínicas (Brito et al., 2012; Romanello et al., 2018). Assim, apesar da temperatura média escrotal poder ser usada como um referencial de interesse clínico, uma abordagem segmentar pode trazer informações mais detalhadas ao médico veterinário e discriminar alterações expressas em regiões de dimensões diminutas (Romanello et al., 2023).

Em bovinos jovens existe correlação negativa do diâmetro do cone vascular testicular com as temperaturas médias superficiais do escroto e com o percentual de defeitos de cabeça de espermatozoides. Além disso, há correlação positiva (r = 0,45) do diâmetro do cone vascular com a porcentagem de espermatozoides normais (Brito et al., 2012). Dessa forma, em função dos distintos aspectos de temperatura de superfície escrotal que podem ser observados nos touros, eles podem ser classificados como portadores de termogramas com padrão normal, anormal ou questionável (Lunstra; Coulter, 1997). Touros bovinos e bubalinos portadores de termogramas normais apresentam padrão escrotal distinguível em três bandas térmicas bem definidas, bilateralmente simétricas e com temperaturas decrescentes da região funicular para a base do escroto. Touros bovinos com termograma anormal apresentam menor gradiente de temperatura testicular e redução na qualidade seminal (Lunstra; Coulter, 1997; Kastelic; Brito, 2012; Menegassi et al., 2015).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A linha que separa os mundos físico e digital está se tornando cada vez mais tênue e essa nova condição traz novos desafios e amplia o número de paradigmas que precisam ser quebrados para a consolidação de uma agricultura digital completa. A crescente adoção de técnicas e métodos disruptivos que propiciam maior controle e precisão dos sistemas de produção é uma realidade na pecuária moderna. Nesse contexto, tecnologias inovadoras como a termografia infravermelha têm contribuído para o maior controle da condição de saúde e de criação dos animais no que se refere à sua resposta, positiva ou negativa, no ambiente de produção.

Dados gerados pelo sensoriamento térmico infravermelho têm apresentado grande consistência e confiabilidade em aplicações destinada a animais de produção de diferentes espécies. Apesar da análise desses dados ainda estar relativamente limitada a processamentos manuais ou semiautomatizados, os *outputs* termográficos poderão, em breve, ser gerados integralmente por inteligência artificial. Esses resultantes têm grande valia para municiar modelos preditivos e modelos prescritivos, o que ampliará o uso da termografia infravermelha por técnicos e produtores rurais, contribuindo para a melhoria dos processos de monitoramento animal e para o aumento da eficiência dos sistemas de produção.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio e os recursos para a execução das pesquisas com termografia infravermelha disponibilizados pela Embrapa (Rede de Agricultura de Precisão), pela Rede ILPF, pela Fapesp (Processos 2015/26627-5, 2019/04528-6 e 2021/04335-3) e pelo CNPq (Processos 307757/2019-6, 404513/2021-2, 312295/2022-7 e 406866/2022-8). Este trabalho foi realizado com apoio complementar do INCT Reprodução Animal e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes), Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

BARROS, D. V.; SILVA, L. K. X.; KAHWAGE, P. R.; LOURENÇO JÚNIOR, J. B.; SOUSA, J. S.; SILVA, A. G. M.; FRANCO, I. M.; MARTORANO, L. G.; GARCIA, A. R. Assessment of surface temperatures of buffalo bulls (*Bubalus bubalis*) raised under tropical conditions using infrared thermography. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 68, n. 2, p. 422-430, 2016. DOI: http://doi.org/10.1590/1678-4162-8327.

BRITO, L. F. C.; BARTH, A. D.; WILDE, R. E.; KASTELIC; J. P. Testicular vascular cone development and its association with scrotal temperature, semen quality, and sperm production in beef bulls. **Animal Reproduction Science**, v. 134, p. 135-140, 2012. DOI: http://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2012.08.025.

CASTANHEIRA, M.; PAIVA, S. R.; LOUVANDINI, H.; LANDIM, A.; FIORVANTI, M. C. S.; DALLAGO, B. S.; CORREA, P. S.; MCMANUS, C. Use of heat tolerance traits in discriminating between groups of sheep in Central Brazil. **Tropical Animal Health and Production**, v. 42, p. 1821-1828, 2010. DOI: http://doi.org/10.1007/s11250-010-9643-x.

CHIU Y. J.; HSU, J. T. Integrated infrared thermography and accelerometer-based behavior logger as a hoof lesion identification tool in dairy cows with various foot diseases under subtropical climates. **Journal of Animal Science**, v. 100, n. 10, p. skac271, 2022. DOI: http://doi.org/10.1093/jas/skac271.

COLAK, A.; POLAT, B.; OKUMUS, Z.; KAYA, M.; YANMAZ, L. E.; HAYIRLI, A. Short Communication: Early detection of mastitis using infrared thermography in dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 91, p. 4244-4248, 2008. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2008-1258.

COULTER, G. H.; SENGER, P. L.; BAILEY, D. R. Relationship of scrotal surface temperature measured by infrared thermography to subcutaneous and deep testicular temperature in the ram. Journal of Reproduction and Fertility, v. 84, n. 2, p. 417-423, 1988. DOI: https://doi.org/10.1530/jrf.0.0840417. PMID: 3199358.

DEAK, F. L. G. B.; CHACUR, M. G. M.; SOUZA, C. D.; ANDRADE, I. B.; CORNACINI, G. F.; GARCIA, A. R.; GABRIEL, L. R.

A. Effects of physiological stage and season on infrared thermograms of different body areas of dairy cows raised under tropical conditions. **Animal Reproduction**, v. 16, n. 2, p. 311-316, 2019. DOI: http://doi.org/10.21451/1984-3143-AR2017-0023.

DIGIOVANI, D. B.; BORGES, M. H. F.; GALDIOLI, V. H. G.; MATIAS, B. F.; BERNARDO, G. M.; SILVA, T. R.; FÁVARO, P. C.; BARCA JÚNIOR, F. A.; LOPES, F. G.; KOETZ JÚNIOR, C.; RIBEIRO, E. L. A. Infrared thermography as diagnostic tool for bovine subclinical mastitis detection. **Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal**, v. 10, n. 4, p. 685-692, 2016. DOI: http://doi.org/10.5935/1981-2965.20160055.

FENNER, K.; YOON, S.; WHITE, P.; STARLING, M.; MCGREEVY, P. The effect of noseband tightening on horses' behavior, eye temperature and cardiac responses. **PLoS ONE**, v. 11, n. 5, p. 1-20, 2016. DOI: http://doi.org/10.1371/journal.pone.0154179.

FLAMENBAUM, I.; WOLFENSON, D.; MAMEN, M.; BERMAN, A. Cooling dairy cattle by a combination of sprinkling and forced ventilation and its implementation in the shelter system. **Journal of Dairy Science**, v. 69, n. 12, p. 3140-3147, 1986. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(86)80778-0.

GARCIA, A. R.; SILVA, L. K. X.; BARROS, D. V.; LOURENÇO JÚNIOR, J. B.; MARTORANO, L. G.; LISBOA, L. S. S.; SILVA, J. A. R.; SOUSA, J. S.; SILVA, A. O. A. Key points for the thermal comfort of water buffaloes in Eastern Amazon. **Ciência Rural**, v. 53, p. e20210544, 2023. DOI: http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210544.

GARCIA, A. R. Degeneração testicular: um problema superado ou ainda um dilema? **Revista Brasileira de Reprodução Animal**, v. 41, p. 33-39, 2017.

GIRO, A.; BERNARDI, A. C. C.; BARIONI JUNIOR, W. B.; LEMES, A. P.; BOTTA, D.; ROMANELLO, N.; BARRETO, A. N.; GARCIA, A. R. Application of microchip and infrared thermography for monitoring body temperature of beef cattle kept on pasture. **Journal of Thermal Biology**, v. 84, p. 121-128, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.06.009.

HERBORN, K. A.; GRAVES, J. L.; JEREM, P.; EVANS, N. P.; NAGER, R.; MCCAFFERTY, D. J.; MCKEEGAN, D. E. F. Skin temperature reveals the intensity of acute stress. **Physiology & Behavior**, v. 152, p. 225-230, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.physbeh.2015.09.032.

HERBORN, K.A.; JEREM, P.; NAGER, R. G.; MCKEEGAN, D. E. F.; MCCAFFERTY, D. J. Surface temperature elevated by chronic and intermittent stress. **Physiology & Behavior**, v. 191, p. 47-55, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.physbeh.2018.04.004.

HURNIK, J. F.; DE BOER, S.; WEBSTER, A. B. Detection of health disorders in dairy cattle utilizing a thermal infrared scanning technique. **Canadian Journal of Animal Science**. v. 64, n. 4, p. 1071-1073, 1984. DOI: http://doi.org/10.4141/cjas84-124.

KAHWAGE, P. R., ESTEVES, S. N., JACINTO, M. A. C., JUNIOR, W. B., PEZZOPANE, J. R. M., PANTOJA, M. H. A., BOSI, C., MIGUEL, M. C. V., MAHLMEISTER, K., GARCIA, A. R. High systemic and testicular thermolytic efficiency during heat tolerance test reflects better semen quality in rams of tropical breeds. **International Journal of Biometeorology**, v. 61, n. 10, p. 1819-1829, 2017. DOI: http://doi.org/10.1007/s00484-017-1367-4.

KASTELIC J. P.; BRITO L. F. Ultrasonography for monitoring reproductive function in the bull. **Reproduction in Domestic Animals,** v. 47, p. 45-51, 2012. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2012.02042.x.

KASTELIC, J. P.; COULTER, G. H.; COOK, R. B. Scrotal surface, subcutaneous, intratesticular, and intraepididymal temperatures in bulls. **Theriogenology**, v. 44, p. 147–52, 1995. DOI: http://doi.org/10.1016/0093-691X(95)00155-2.

KNIZKOVA, I.; KUNC, P.; GÜRDIL, K. A. G.; PINAR, Y.; SELVI, Ç. K. Applications of infrared thermography in animal production. **Anadolu Journal of Agricultural Sciences**, v. 22, n. 3, p. 329-336, 2007.

KOZUMPLIK, J.; MALIK, K.; OCHOTSKY, J. Využití termografické metody k diagnostice zanětlivých procesů lokalizovaných na pohlavních orgánech plemeníků. **Veterinarstvi**, v. 39, p. 305-307, 1989.

LUNSTRA, D. D.; COULTER, G. H. Relationship between scrotal infrared temperature patterns and natural-mating fertility in beef bulls. **Journal of Animal Science**, v.75, p.767-774, 1997. DOI: http://doi.org/10.2527/1997.753767x.

LUZI, F.; MITCHELL, M.; COSTA, L. N.; REDAELLI, V. **Thermography:** current status and advances in livestock animals and in veterinary medicine. Brescia, Italy: Edito a cura Fondazione Iniziative Zooprofilattiche e Zootecniche, 2013. 236 p.

MACHADO, N. A. F.; DA COSTA, L. B. S.; BARBOSA-FILHO, J. A. D.; DE OLIVEIRA, K. P. L.; DE SAMPAIO, L. C.; PEIXOTO, M. S. M.; DAMASCENO F. A. Using infrared thermography to detect subclinical mastitis in dairy cows in compost barn systems. **Journal of Thermal Biology**, n. 97, p. 102881, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.102881.

MCCAFFERTY, D. J. The value of infrared thermography for research on mammals: previous applications and future directions. **Mammal Review**, v. 37, n. 3, p. 207-223, 2007. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1365-2907.2007.00111.x.

MCCAFFERTY, D. J.; MONCRIEFF, J. B.; TAYLOR, I. R.; BODDIE, G. F. The use of IR thermography to measure the radiative temperature and heat loss of a barn owl (Tyto alba). **Journal of Thermal Biology**, v. 23, p. 311-318, 1998. DOI: http://doi.org/10.1016/S0306-4565(98)00022-9.

MCMANUS, C.; BIANCHINI, E.; PAIM, T. P.; LIMA, F. G.; BRACCINI NETO, J.; CASTANHEIRA, M.; ESTEVES, G. I. F.; CESAR CARDOSO, C.; DALCIN, V. C. Infrared thermography to evaluate heat tolerance in different genetic groups of Lambs. **Sensors**, v. 15, p. 17258-17273, 2015. DOI: http://doi.org/10.3390/s150717258.

MCMANUS, C.; TANURE, C. B.; PERIPOLLI, V.; SEIXAS, L.; FISCHER, V.; GABBI, A. M.; MENEGASSI, S. R. O.; STUMPF, M. T.; KOLLING, G. J.; DIAS, E.; COSTA JUNIOR, J. B. G. Infrared thermography in animal production: an overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 123, p. 10-16, 2016. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.027.

MENEGASSI, S. R.; PEREIRA, G. R.; DIAS, E. A.; KOETZ JUNIOR, C.; LOPES, F. G.; BREMM, C.; PIMENTEL, C.; LOPES, R. B.; da ROCHA, M. K.; CARVALHO, H. R.; BARCELLOS, J. O. The uses of infrared thermography to evaluate the effects of climatic variables in bull's reproduction. International Journal of Biometeorology, v. 60, n. 1, p. 151-157, 2016. DOI: https://doi.org/10.1007/s00484-015-1013-y. PMID: 26049285.

MENEGASSI, S. R. O.; BARCELLOS, J. O. J.; DIAS, E. A.; KOETZ JR, C.; PEREIRA, G. R.; PERIPOLLI, V.; MCMANUS, C.; CANOZZI, M. E. A.; LOPES, F. G. Scrotal infrared digital thermography as a predictor of seasonal effects on sperm traits in Braford bulls. **International Journal of Biometeorology**, v. 59, p. 357-364, 2015. DOI: http://doi.org/10.1007/s00484-014-0847-z.

MITCHELL, M. A. Thermal imaging in physiology: theoretical and practical considerations. In: LUZI, F.; MITCHELL M. A.; NANNI COSTA, L.; REDAELLI, V. (Eds.). **Thermography:** current status and advances in livestock animals and in veterinary medicine. Brescia, Italy: Fondazione Iniziative Zooprofilattiche e Zootecniche, 2013. p. 47-65.

MONTANHOLI, Y. R.; ODONGO, N. E.; SWANSON, K. C.; SCHENKEL, F. S.; MCBRIDE, B. W.; MILLER, S. P. Application of infrared thermography as an indicator of heat and methane production and its use in the study of skin temperature in response to physiological events in dairy cattle (*Bos taurus*). **Journal of Thermal Biology**, v. 33, p. 468-475, 2008. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2008.09.001.

MOURA, A. B. B.; BRANDÃO, F. Z.; ESTEVES, S. N.; NUNES DE SOUZA, G.; FONSECA, J. F. D.; PANTOJA, M. H. A.; ROMANELLO, N.; BOTTA, D.; GIRO, A.; GARCIA, A. R. Differences in the thermal sensitivity and seminal quality of distinct ovine genotypes raised in tropical conditions. **Theriogenology**, v. 1, p. 123-131, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2018.09.037.

MOURA, J. D.; MAIA, A. P. A.; VERCELLINO, R. A.; MEDEIROS, B. B. L.; SARUBBI, J.; GRISKA, P. R. Uso da termografia infravermelha na análise da termorregulação de cavalo em treinamento. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 1, p. 23-32, 2011. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-69162011000100003.

NIKKAH, A.; PLAIZIER, J. C.; EINARSON, M. S.; BERRY, R. J.; SCOTT, S. L.; KENNEDY, A. D. Short communication: infrared thermography and visual examination of hooves of dairy cows in two stages of lactation. **Journal of Dairy Science**; v. 88, n. 8, p. 2749-2753, 2005. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72954-4.

PAIM, T. P.; MARTINS, R. F. S.; CARDOSO, C.; DALLAGO, B.; LOUVANDINI, H.; MCMANUS, C. Thermal comfort index and infrared temperatures for lambs subjected to different environmental conditions. **Scientia Agricola**, v. 71, n. 5, p. 345-355, 2014. DOI: http://doi.org/10.1590/0103-9016-2013-0191.

PANTOJA, M. H. A.; ESTEVES, S. N.; JACINTO, M. A. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; PAZ, C. C. P.; SILVA, J. A. R.; LOURENÇO JUNIOR, J. B.; BRANDÃO, F. Z.; MOURA, A. B. B.; ROMANELLO, N.; BOTTA, D.; GARCIA, A. R. Thermoregulation of male sheep of indigenous or exotic breeds in a tropical environment. **Journal of Thermal Biology**, v. 69, p. 302-310, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.09.002.

PEREZ MARQUEZ, H. J.; AMBROSE, D. J.; SCHAEFER, A. L; COOK, N. J.; BENCH, C. J. Infrared thermography and behavioral biometrics associated with estrus indicators and ovulation in estrus-synchronized dairy cows housed in tiestalls. **Journal of Dairy Science**, v. 102, v. 5, p. 4427-4440, 2019. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2018-15221.

PEZESHKI, A.; STORDEUR, P.; WALLEMACQ, H.; SCHYNTS, F.; STEVENS, M.; BOUTET, P.; PEELMAN, L. J.; SPIEGELEER, B.; DUCHATEAU, L.; BUREAU, F.; BURVENICH, C. Variation of inflammatory dynamics and mediators in primiparous cows after intramammary challenge with Escherichia coli. **Veterinary Research**, v. 42, n. 15, p. 1-10, 2011. DOI: http://doi.org/10.1186/1297-9716-42-15.

RING, E. F. J.; AMMER, K. Infrared thermal imaging in medicine. **Physiological Measurement**, v. 33, n. 3, p. 33-46, 2012. DOI: http://doi.org/10.1088/0967-3334/33/3/R33.

ROGALSKI, A. Recent progress in infrared detector technologies. **Infrared Physics & Technology**, v. 54, p. 136-154, 2011. DOI: http://doi.org/10.1016/j.infrared.2010.12.003.

ROMANELLO, N.; BARRETO, A. N.; SOUSA, M. A. P.; BALIEIRO, J. C. C.; BRANDAO, F. Z.; TONATO, F.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; PORTUGAL, J. A. B.; GARCIA, A. R. Thermal comfort of Nelore (*Bos indicus*) and Canchim (*Bos taurus* x *Bos indicus*) bulls kept in an integrated crop-livestock-forestry system in a tropical climate. **Agricultural Systems**, v. 209, p. 103687, 2023. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103687.

ROMANELLO, N.; LOURENÇO JUNIOR, J. B.; BARIONI JUNIOR, W.; BRANDÃO, F. Z.; MARCONDES, C. R.; PEZZOPANE, J. R. M.; PANTOJA, M. H. A.; BOTTA, D.; GIRO, A.; MOURA, A. B. B.; BARRETO, A. N.; GARCIA, A. R. Thermoregulatory responses and reproductive traits in composite beef bulls raised in a tropical climate. **International Journal of Biometeorology**, v. 62, p. 1575-1586, 2018. DOI: http://doi.org/10.1007/s00484-018-1557-8.

SILVA, L. K. X.; SOUSA, J. S.; SILVA, A. O. A.; LOURENÇO JUNIOR, J. B.; FATURI, C.; MARTORANO, L. G.; FRANCO, I. M.; PANTOJA, M. H. A.; BARROS, D. V.; GARCIA, A. R. Testicular thermoregulation, scrotal surface temperature patterns, and semen quality of water buffalo bulls reared in a tropical climate. **Andrologia**, v. 50, n. 2, p. e12836, 2017. DOI: http://doi.org/10.1111/and.12836.

SOERENSEN, D. D.; CLAUSEN, S.; MERCER, J. B.; PEDERSEN, L. J. Determining the emissivity of pig skin for accurate infrared thermography. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 109, p. 52-58, 2014. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2014.09.003.

SOUSA, M. A. P.; ESTEVES, S. N.; SILVA, A. G. M.; BRANDÃO, F. Z.; DAHER, L. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; VOLANTE, C. A.; BARRETO, A. N.; GARCIA, A. R. Major differences between single or twin hair lambs in the immediate postpartum period: Metabolic and thermodynamic patterns detected by infrared thermography. **Journal of Thermal Biology**, v. 106, p. 103258, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2022.103258.

STEWART, M.; STAFFORD, K. J.; DOWLING, S. K.; SCHAEFER, A. L.; WEBSTER, J. R. Eye temperature and heart rate variability of calves disbudded with or without local anesthetic. **Physiology & Behavior**, v. 93, n. 4, p. 789-797, 2008. DOI: http://doi.org/10.1016/j.physbeh.2007.11.044.

TOMMASONI, C.; FIORE, E.; LISUZZO, A.; GIANESELLA, M. Mastitis in dairy cattle: on-farm diagnostics and future perspectives. **Animals**, v. 13, n. 15, p. 2538, 2023. DOI: http://doi.org/10.3390/ani13152538.

VAINTRUB, M. O.; LEVIT, H.; CHINCARINI, M.; FUSARO, I.; GIAMMARCO, M.; VIGNOLA, G. Precision livestock farming, automats and new technologies: possible applications in extensive dairy sheep farming. **Animal**, v. 15, n. 3, p. 100143, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100143.

VICENTINI, R. R.; MONTANHOLI, Y. R.; VERONEZE, R.; OLIVEIRA, A. P.; LIMA, M. L. P.; UJITA, A.; EL FARO, L. Infrared thermography reveals surface body temperature changes during proestrus and estrus reproductive phases in Gyr heifers (*Bos taurus indicus*). **Journal of Thermal Biology**, v. 92, p. 102662, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102662.

ZANINELLI, M., REDAELLI, V., LUZI, F., BRONZO, V., MITCHELL, M., DELL'ORTO, V., BONTEMPO, V., CATTANEO, D., SAVOINI, G. First evaluation of infrared thermography as a tool for the monitoring of udder health status in farms of dairy cows. **Sensors**, v. 18, n. 3, p. 862, 2018. DOI: http://doi.org/10.3390/s18030862.

ZHANG, C.; XIAO, D.; YANG, Q.; WEN, Z.; LV, L. Application of infrared thermography in livestock monitoring. **Transactions of the ASABE**, v. 63, n. 2, p. 389-399, 2020. DOI: http://doi.org/10.13031/trans.13068.

77

Adubação à taxa variável e uso eficiente de nutrientes em pastagens

Variable rate fertilization and efficient use of nutrients in pastures

Alberto Carlos de Campos Bernardi[1]

[1] *Engenheiro Agrônomo, Dr., Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alberto.bernardi@embrapa.br*

RESUMO

A agricultura de precisão (AP) é a alternativa para o manejo eficiente na propriedade, tendo como base a detecção, mapeamento, interpretação e estabelecimento de estratégias de manejo considerando a variabilidade temporal e espacial das propriedades do solo e das culturas para maximizar o retorno econômico e minimizar os riscos de danos ao meio ambiente. O conhecimento da variabilidade espacial das propriedades do solo é útil para o uso racional de insumos, como na aplicação a taxa variável de calcário e fertilizantes. O manejo intensivo de pastagens integra diferentes tecnologias, como calagem e adubação do solo e pastejo rotacionado. Considerando que o calcário e os fertilizantes são fatores críticos para a intensificação dos sistemas de pastagens, a AP é o conjunto de ferramentas para melhorar a eficiência do uso desses insumos. O fornecimento de fertilizantes é um dos principais custos de manutenção da pastagem permanente. Os aspectos agronômicos, ambientais e econômicos devem ser considerados na análise da sustentabilidade de um sistema de produção. Este capítulo discutirá a variabilidade espacial das propriedades do solo e aplicação de calagem e fertilizantes em uma taxa variável e análise econômica de sistemas de pastagens manejadas intensivamente. Os resultados mostraram que a análise espacial das necessidades de calagem e adubação podem fornecer ferramentas de gestão para o manejo de pastagens. E a tecnologia da aplicação de calcário e fertilizante fosfatado à taxa variável pode ser utilizada como ferramenta de correção e adubação do solo levando à maior homogeneidade dos atributos químicos do solo e contribuindo para melhor retorno econômico do sistema de produção.

Palavras-chave: análise de solo; geoprocessamento; taxa variável; calagem; adubação fosfática; análise econômica.

ABSTRACT

Precision Agriculture (PA) is the way to achieve efficient farm management based on detection, mapping, interpretation, and establishing management strategies based on crop and soil space and temporal variability to maximize economic returns and minimize environmental damage risks. Knowledge of spatial variability of soil properties helps the rational use of inputs, as in the site-specific application of lime and fertilizer. Intensive pasture management integrates technologies such as soil liming and fertilization, irrigation, and rotational grazing. Since lime and fertilizer are critical factors for the intensification of pasture systems, precision agriculture (PA) is the tool to improve the efficiency of these issues. Fertilizer supply is the main cost of maintenance of permanent pastures. Therefore, the agronomic, environmental, and economic aspects should be considered in the analysis of the sustainability of a production system. This chapter will discuss the spatial variability of soil properties, liming and fertilizer application at a variable rate, and economic analysis of intensively managed pasture systems. The results showed that spatial analysis of liming and fertilization needs could provide management tools for pasture management. Furthermore, variable rate lime and phosphate fertilizer application technology can be used as a soil correction and fertilization tool, leading to greater homogeneity of soil chemical attributes and a better economic return of the production system.

Keywords: soil testing; geoprocessing; variable rate; lime; phosphorus fertilizer; economic analysis.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000067

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

As pastagens são um importante ecossistema terrestre, representando cerca de um terço da superfície terrestre da Terra, e possuem funções de proteção ecológica extremamente importantes como conservação do solo e da água, fixação de carbono e liberação de oxigênio, preservação da biodiversidade, além de ser uma importante fonte de alimentos, fibras e energia (Lopez et al., 2022). No Brasil estima-se que a área total de pastagens seja de 166 milhões de ha, e que cerca de 16% (ou 25,7 milhões ha) estão altamente degradados, e outros 39% (63,3 milhões ha) estão moderadamente degradados (Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento, 2020) apresentando baixa produtividade. Por esse levantamento existem cerca de 74,7 milhões de ha (ou 45% da área total) com pastagens em condições adequadas, que podem garantir adequadas produtividades.

Aqui no Brasil, os sistemas predominantes de produção de gado de corte e leite são baseados principalmente em pastejo de pastagens nativas e cultivadas, que são mantidas em lotação contínua, ou rotacionada durante todo o ano, e é a principal fonte de alimentação animal. Cerca de 90% dos nutrientes requeridos pelos ruminantes são obtidos diretamente do pastejo (Euclides et al., 2010).

Um dos principais problemas das pastagens no Brasil apontado por técnicos e produtores é a baixa fertilidade do solo, sendo o ajuste da taxa de lotação e fornecimento de corretivos e fertilizantes as principais soluções utilizadas pelos produtores (Santos; Euclides, 2022).

A intensificação do manejo das pastagens tropicais (Figura 1) é uma estratégia para aumentar a produção de carne e leite (Cardoso et al., 2020). A adoção de estratégias de intensificação da produção pecuária em áreas de pastagens tropicais depende do conhecimento dos produtores sobre solo, recursos hídricos, manejo vegetal e animal e do mercado, e sua implementação envolve diversas técnicas específicas aplicadas em conjunto (Cardoso et al., 2020). Entre as técnicas de intensificação, que permitem aumento das taxas de lotação e da produtividade estão a substituição das espécies de forrageiras por outras mais responsivas e produtivas, pastejo rotacionado, disponibilidade de forragem na estação seca, regulação das taxas de lotação, melhoramento genético do rebanho de bovinos e aumento da fertilidade do solo por meio do fornecimento equilibrado de fertilizantes (Primavesi et al., 1999).

A produtividade da pastagem é determinada por vários fatores como espécie, condições climáticas e de solo e práticas de manejo. Porém, o manejo da fertilidade do solo e do estado nutricional é uma prática que tem grande impacto na produtividade e qualidade das pastagens, longevidade, bem como alta produtividade animal com menores impactos ambientais (Cantarella et al., 2002; Bernardi et al., 20012). As pesquisas em regiões tropicais e subtropicais têm destacado a necessidade de suprir o sistema de pastagem com macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Mo, Mn e Zn), bem como o solo visto que a adubação é um dos fatores que mais contribuem para aumentar a produtividade e a qualidade

Figura 1. Pastagens tropicais manejadas intensivamente.

da matéria seca da forragem (Primavesi et al., 1999; Cantarella et al., 2002; Bernardi et al., 2012). Em geral, o N é o nutriente que mais limita o crescimento das plantas e afeta a produtividade das pastagens (Martha Júnior et al., 2004).

O uso de fertilizantes tem sido tema de preocupação devido ao cenário de alta dependência externa e elevação dos preços. Bernardi e Mantovani (2021) discutiram e apresentaram alternativas para uso das tecnologias digitais como forma de aumento da eficiência do uso de nutrientes.

Este capítulo discutirá a variabilidade espacial das propriedades do solo e aplicação de calagem e fertilizantes em uma taxa variável, assim como a análise econômica de sistemas de pastagens manejadas intensivamente.

2 AGRICULTURA DE PRECISÃO EM PASTAGENS

A agricultura de precisão (AP) pode auxiliar na melhoria da eficiência de uso de fertilizantes, pois o manejo da fertilidade do solo, sem levar em conta a variação espacial dentro das áreas de produção, pode afetar diretamente a produtividade e a qualidade ambiental (Bernardi et al., 2016). Isso porque o conhecimento da variabilidade espacial das propriedades do solo é útil para a aplicação localizada e à taxa variável de calcário e fertilizantes, contribuindo, assim, para o uso racional dos insumos (Bernardi et al., 2015). O manejo intensivo de pastagens integra várias tecnologias como correção do solo e adubação, irrigação e pastejo rotacionado. O uso de calcário e o fertilizante são fatores-chave para a intensificação do manejo de pastagens, a AP é a ferramenta para melhorar a eficiência do uso desses insumos.

As ferramentas de AP têm sido utilizadas com maior frequência nas culturas de grãos, hortícolas, fruteiras e silvicultura, mas há um grande potencial para uso nos sistemas de produção animal baseados no uso de pastagens tropicais para ruminantes (Bernardi; Perez, 2014). O potencial, benefícios e limitações do uso da AP em sistemas de pastagens foi apresentado e discutido por Schellberg et al. (2008).

A utilização de tecnologias digitais pelos pecuaristas tem potencial para aumentar, como indicado por Bolfe et al. (2021) em pesquisa realizada com um grupo selecionado de 334 pecuaristas (que também eram agricultores). No levantamento verificaram que apenas 18% dos entrevistados informaram não fazer uso de nenhuma ferramenta digital. Entre as aplicações estavam a utilização de aplicativos móveis, softwares ou plataformas digitais para obter informações e apoiar a gestão da propriedade (64%); ferramenta digital para gestão da propriedade (45%); sensores remotos (satélites e/ou drones) e sistemas de posicionamento global por satélite (GPS) para monitorar e planejar, mapear e fazer uso da terra na propriedade (34%); aplicativos móveis e/ou plataformas para compra de insumos ou comercialização da produção (40%); aplicação de tecnologia digital em bem-estar animal (30%); previsão climática (25%); e sensores remotos (20%). Estes números indicam que as tecnologias digitais estão se tornando acessíveis e certamente poderão contribuir em vários níveis da produção pecuária nos próximos anos.

O uso de ferramentas de AP, como a amostragem de solo georreferenciada e a aplicação de insumos a taxa variável, tem sido utilizado em áreas piloto na Embrapa Pecuária Sudeste como forma de validar essa tecnologia. Os resultados têm indicado que é possível mapear e avaliar a variabilidade espacial das propriedades do solo e recomendar a calagem e aplicação de fertilizante com base nesses mapas, aumentando a eficiência do uso e otimizando o uso de recursos, aplicando a dose certa, no local certo e na época mais adequada.

A abordagem utilizada nesses estudos baseia-se no ciclo proposto por Gebbers e Adamchuk (2010), que se inicia na i) coleta dos dados (amostragem de solo); ii) análises (químicas e físicas de solo) e interpretação desses dados; iii) geração das recomendações (com base na literatura disponível); iv) geração dos mapas; v) aplicação ou intervenção no campo; e vi) avaliação (agronômica ou econômica) dos resultados.

3 AMOSTRAGEM DE SOLO

O procedimento predominante no Brasil para mapeamento das propriedades do solo envolve a coleta de amostras em grades georreferenciadas, envio destas para análises em laboratórios de fertilidade e, posteriormente, geração dos mapas utilizando métodos de interpolação (Bernardi et al., 2015).

A estratégia de amostragem de solo, por grade regular ou zonas de manejo, é crítica para o gerenciamento preciso da variabilidade espacial das propriedades do solo e das plantas, principalmente para a aplicação de taxas variáveis. O tamanho da grade amostral está relacionado com a acurácia da amostragem e ao custo. Nanni et al. (2011) verificaram que grades de amostragem de solo utilizadas em diversas culturas brasileiras variam de 0,2 a 1 amostra por ha. Bernardi e Inamasu (2014) verificaram que a maioria dos adotantes de AP no Brasil utilizam grades com 1 amostra coletada a cada 3 a 5 ha. Em muitas situações, essa amostragem em grade na quantidade realizada atu-

almente não é suficiente para obter um mapa com qualidade para aplicação de fertilizantes.

Os métodos de amostragem de solo podem ser divididos nas diferentes modalidades descritas a seguir e estão representadas na Figura 2. Na Tabela 1 são discutidas as vantagens e desvantagens de cada método, com a apresentação dos pontos forte e pontos fracos e os conhecimentos necessários na amostragem de solo e na interpretação dos resultados, assim como a possibilidade de erros na intervenção na área, ou na implementação da prática da adubação ou calagem.

- **Tradicional** (A) é realizado com o caminhamento em zigue-zague cobrindo toda parcela.
- **Grade por ponto** com o uso de um sistema de informação geográfica (SIG); são gerados polígonos regulares, e dentro de cada um há um ponto amostral, que poderá ser **sistemático ou regular** (B), se estiver no centro, ou **aleatório** (C) se estiver em uma posição aleatória dentro do polígono. Tem sido utilizada a coleta em torno de 8 a 12 subamostras por ponto para a amostragem de solo, que serão homogeneizadas gerando então uma amostra composta e o resultado da análise é atribuído a toda a área da grade.
- **Grade por célula** (D), a parcela é dividida em subáreas, podendo estas ser regulares ou irregulares, em que cada subárea corresponde a uma célula;
- **Estratificado ou direcionado** (E), não há uma ordem regular dos pontos da amostragem, que são selecionados com o uso de mapas (por exemplo de

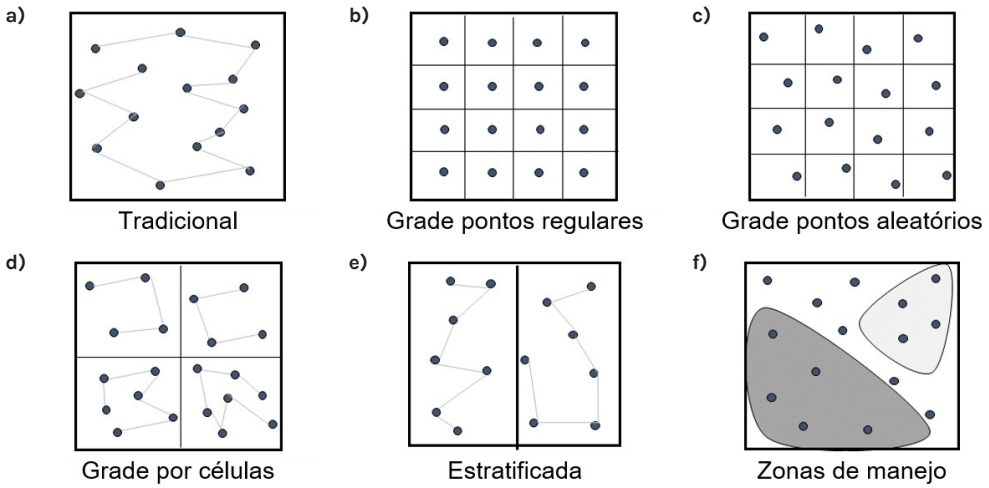


Figura 2. Representação dos métodos de amostragem de solo tradicional (A), em grade com pontos regulares (B) ou aleatórios (C), por células (D), estratificada (E) e por zonas de manejo (F).
Elaborado a partir de Colaço & Molin (2014).

Tabela 1. Pontos fortes e fracos dos métodos de amostragem de solo.

Amostragem	Metodologia	Conhecimento necessário		Erros na adubação
		Amostragem	Interpretação	
Tradicional	Boas práticas para coleta de amostras de solo	Médio a alto	Baixo	Alto
Grade - célula	Amostras coletadas aleatoriamente a partir de células predeterminadas	Baixo	Baixo	Médio
Grade - ponto	Ponto georreferenciado, 10 a 15 subamostras coletadas de 2,5 a 3 m do centro do ponto	Baixo	Alto	Baixo a médio
Estratificada (tipo de solo)	Amostras de solo compostas coletadas com base no mapa de solo	Médio a alto	Médio	Médio a alto
Estratificada	Com base no histórico da área	Médio	Baixo	Médio a alto
Zonas de manejo	Amostras de solo coletadas nas zonas de manejo	Médio	Alto	Médio
"Achômetro"	Não fazer amostragem	Baixo	Baixo	Muito alto

Fonte: Adaptado de Clay e Carlson (2016).

produtividade, índices de vegetação, relevo ou textura) já existentes da parcela;

- **Zona de manejo** (F) são regiões delimitadas dentro das parcelas, que apresentam condições semelhantes com base em alguma medida quantitativa como classes de solo, mapas de produtividade, imagens de satélite ou imagens aéreas ou outras medidas (Fridgen et al., 2004; Filippini-Alba; Flores; Bernardi, 2023).

As grades de amostragem fixas e padronizadas, além de mais caras e laboriosas, podem não fornecer as informações necessárias para o correto diagnóstico das necessidades nutricionais (Bernardi et al., 2015). O uso de sensores pode auxiliar a delimitar regiões (ou zonas de manejo) e, a partir desses limites, estabelecer pontos de amostragem mais direcionados. A associação dos conhecimentos pedológicos (Filippini-Alba et al., 2023) é essencial para estabelecer as zonas de manejo e direcionar a amostragem do solo.

4 ANÁLISE DE SOLO

A análise de solo para fins de recomendação de calagem e fertilizantes é um processo que utiliza métodos químicos para estimar a disponibilidade de nutrientes, simulando a capacidade de extração das plantas. É uma ferramenta valiosa para tomada de decisões sobre o manejo de nutrientes, pois com a interpretação dos resultados é possível realizar manejo químico do solo de maneira eficiente e econômica (Van Raij, 1991). Os resultados da análise determinam o estoque de nutrientes no solo e os limitantes químicos no momento anterior ao plantio, possibilitando a recomendação de correção e adubação, bem como monitorar e avaliar periodicamente o balanço dos nutrientes no solo. Além disso, o balanço de nutrientes no sistema solo-planta pode ser considerado um indicador da sustentabilidade do uso agrícola do solo.

O estabelecimento da análise de solo em uma região ou estado é precedido por pesquisa para seleção dos métodos, por meio de estudos de correlação e de calibração (Van Raij, 1991; Sobral et al., 2015). A avaliação da disponibilidade dos nutrientes no solo é por métodos (Primavesi et al., 2005) selecionados a partir dos estudos de correlação entre as quantidades do nutriente extraídas do solo e as quantidades do nutriente absorvidas por plantas indicadoras (Van Raij, 1991; Sobral et al., 2015).

5 INTERPRETAÇÃO E RECOMENDAÇÃO

Os resultados de análise de solo obtidos por métodos que se correlacionam com o crescimento da planta têm sua interpretação limitada caso não se disponham dos padrões de comparação. Dessa forma estabelece-se o procedimento de calibração, que são experimentos de campo, nos quais se avalia a produção das culturas em relação aos teores do nutriente medidos no solo (Van Raij, 1991; Sobral et al., 2015). A interpretação dos resultados de análise de solo tem como base os conceitos de nível de suficiência de nutrientes disponíveis, de acúmulo ou construção da fertilidade e manutenção (Olson et al., 1987; Chaganti; Culman, 2018). O nível de suficiência indica os níveis críticos (mínimos) de nutrientes individuais e indica a fase de "adubação do solo". A partir dos níveis mais elevados há os níveis de construção (ou acúmulo) de nutrientes, e em seguida os níveis de manutenção, nos quais serão repostos às quantidades de cada nutriente removido pela cultura na colheita, ou a adubação da planta. A Tabela 2 sintetiza as faixas de interpretação dos resultados de análise de solo para fins de recomendação de calagem e fertilizantes, e foram organizadas a partir das publicações de Van Raij et al. (1996) e Alvarez Venegas et al. (1999).

Toda recomendação de calagem e adubação realizada periodicamente deve ter como base os resulta-

Tabela 2. Faixas de interpretação de resultados de análise de solo no sistema internacional de unidades.

Interpretação	pH[€]	pH[§]	M.O. [§]	P_{resina} [€]	K[€]	Ca[§]	Mg[§]	Al^{3+}[§]	H+Al[§]	SB[§]	CTC[§]	V[€]	m[§]
	$CaCl_2$	água	g dm^{-3}	mgdm^{-3}	$mmol_c$ dm^{-3}							%	
Muito baixa	>6	7	7	0 - 5	0 - 0,7	<4	< 1,5	<2	< 10	< 6	< 16	0 - 25	< 15
Baixa	5,6 - 6	6,1 - 6,9	7,1 a 20	6 a 12	0,8 - 1,5	4,1 a 12	1,6 - 4,5	2,1 - 5	10,1 - 25	6,1 - 18	16,1 a 43	26 - 50	15,1 – 30
Média	5,1 - 5,5	5,1 - 6,0	20,1 a 40	13- 30	1,6 - 3	12,1 a 24	4,6 a 9	5,1 - 10	25,1 - 50	18,1 - 36	43,1 a 86	51 - 70	30,1 – 50
Alta	4,4 - 5,0	4,5 - 5,0	40,1 a 70	31 a 60	3,1 - 6	24,1 a 40	9,1 a 15	10,1 - 20	50,1 - 90	36,1 - 60	86,1 a 150	71 - 90	50,1 – 75
Muito alta	< 4,3	< 4,5	> 70	> 60	> 6	> 40	> 15	> 20	> 90	> 60	> 150	> 90	> 75

[€]Van Raij et al. (1996); [§]Alvarez Venegas et al. (1999).

dos de análises químicas realizadas previamente em amostras coletadas nos diferentes sistemas de produção. Com isso, evita-se o uso de quantidades fixas de calcário e de formulações de fertilizantes, que se utilizadas sem critérios podem levar a desbalanços. As recomendações de calagem e de adubação de pastagens podem ser encontradas em Werner et al. (1996), Cantarutti et al. (1999) e Vilela et al. (2004). Macedo (2004) analisou comparativamente essas recomendações e indicou que não havia grandes diferenças para a fase de estabelecimento, mas para a manutenção essas diferenças eram maiores. Com essas tabelas é possível recomendar a calagem e a adubação (com base na análise de solo e na exigência da forrageira) e estimar a produtividade em manejo semi-intensivo, sem, contudo, explorar todo o potencial de produção da forrageira utilizada. A adubação nitrogenada deve ser calculada em função do nível de produção desejada, ser realizada na época das águas e parcelada em no máximo 60 kg por ha por ciclo de pastejo (Costa et al., 2006; Euclides; Montagner, 2013).

Os níveis de adubação nos sistemas mais intensivos de manejo de pastagens são muito mais elevados do que os utilizados na maioria das culturas produtoras de grãos, em razão do elevado potencial de resposta das gramíneas à adubação (Primavesi et al., 2004; Martha Júnior et al., 2004). Além disso, estas recomendações de calagem e adubação para pastagens são estáticas, não contemplam os diferentes níveis tecnológicos de intensificação da produção. Em face da necessidade de reunir, organizar e disponibilizar de forma dinâmica essas informações existentes para os produtores e técnicos, a Embrapa Pecuária Sudeste criou o software Adubapasto 1.0 (Oliveira et al., 2010), gratuito e com acesso remoto pela web. Posteriormente, o software foi atualizado e atualmente está disponível para o público na versão 2.0 (Bernardi et al., 2020).

6 SENSORIAMENTO PROXIMAL E REMOTO DO SOLO

Apesar da evolução das tecnologias de AP, o diagnóstico da variabilidade espacial dos atributos de fertilidade do solo ainda é um desafio em todo o mundo (Viscarra Rossel; Bouma, 2016). Os sensores de campo têm sido utilizados para a detecção da variabilidade e para aumentar a quantidade de dados, possibilitando a implementação da AP (Viscarra Rossel; Bouma, 2016; Molin; Tavares, 2019). Há diferentes sensores proximais para medidas de solo, os quais atuam de forma não destrutiva e minimamente invasiva, podendo ser de eletromagnéticos, ópticos, mecânicos, acústicos e eletroquímicos (Adamchuk et al., 2004; Molin; Tavares, 2019). A maioria destes sensores fornece um sinal de saída, que pode ser influenciado por propriedades químicas, físicas e biológicas do solo.

Essas propriedades do solo podem variar espacialmente dentro de um mesmo talhão até a escala regional em função de fatores intrínsecos, como os de formação do solo, e extrínsecos, como as práticas de manejo, adubação e rotação de culturas (Cambardella; Karlen, 1999; McBratney; Santos; Minasny, 2003; Viscarra Rossel; Bouma, 2016). Dessa forma, as variações das propriedades do solo devem ser monitoradas e quantificadas para entender os efeitos do uso da terra e sistemas de gestão de solos. Por isso, os levantamentos de solos têm um foco maior em modelagem quantitativa com o acompanhamento para fornecer informações que considerem a acurácia e as incertezas (McBratney; Santos; Minasny, 2003).

As técnicas de sensoriamento proximal e remoto do solo têm sido utilizadas na avaliação da variabilidade de atributos do solo pois são alternativas rápidas, geralmente de baixo custo e que permitem amostragens intensivas do solo (Demattê et al., 2015; Viscarra Rossel; Bouma, 2016; Molin; Tavares, 2019; Filippini-Alba et al., 2023).

O conceito de sensoriamento proximal do solo refere-se ao uso de sensores compatíveis com operações em campo que atuam em contato ou próximas à superfície do solo (aproximadamente 2 m) (Viscarra Rossel; Bouma, 2016; Molin; Tavares, 2019).

As medidas da condutividade elétrica aparente do solo (EC_a) e da resistividade elétrica (ER) combinadas com sistemas globais de navegação por satélite (*Global Navigation Satellite Systems* – GNSS) e sistemas de informação geográfica (*Geographical Information Systems* – GIS) tem sido uma das técnicas mais utilizadas para caracterizar os padrões espaciais das propriedades do solo (Corwin; Lesch, 2005; Samouëlian et al., 2005; Serrano et al., 2014). A EC_a e ER apresentam correlações significativas com propriedades do solo como teores de argila, matéria orgânica, concentração de sais ou umidade (Samouëlian et al., 2005; Machado et al., 2006; Bernardi et al., 2018b, 2019b).

Existem sensores comerciais para medir a EC_a no campo com ou sem contato com o solo. Os sensores sem contato ou não invasivos são baseados no princípio de indução electromagnética – EMI (Corwin; Lesch, 2005). Os sensores de contato introduzem uma corrente elétrica no solo através de elétrodos situados em discos que contatam com o solo e medem a resistência elétrica RE (Corwin; Lesch, 2005). Existem também equipamentos comerciais que medem a resistividade elétrica (ER) do solo (Samouëlian et al., 2005, Dabas, 2008). A EC_a (Moral et al., 2010; Bernardi et al.,

2018b) e a ER (Bernardi et al., 2019b) podem ser utilizadas para delinear zonas de manejo diferenciado.

7 MAPEAMENTO

Um mapa de solo com propriedades medidas é uma das camadas de dados mais importantes ao preparar prescrições para intervenção nos sistemas de produção utilizando as ferramentas de AP. A Figura 3 ilustra os resultados georreferenciados da análise química de rotina de uma área de produção, considerando as faixas de interpretação (Tabela 2).

A caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo e das culturas e a estimativa das relações desses atributos no espaço e no tempo ocorre com a aplicação da geoestatística. A interpolação dos mapas pode ser realizada por diversas técnicas ou métodos, a qual permite, a partir dos pontos vetoriais com valores

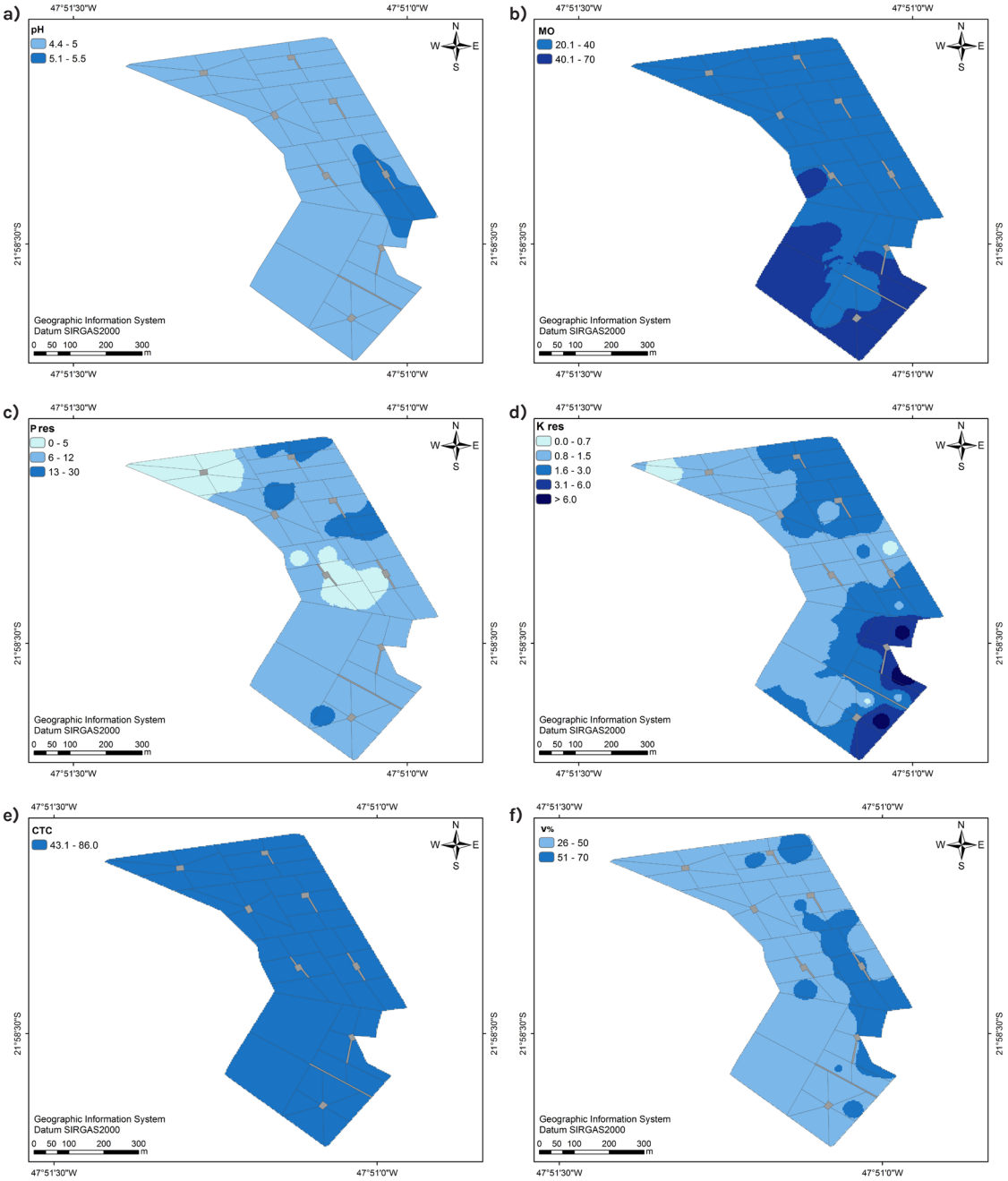


Figura 3. Resultados espacializados de análise de solo em sistema integrado e faixas de interpretação para pH (A), matéria orgânica (B), fósforo (C), potássio (D), capacidade de troca de cátions – CTC (E) e saturação por bases – V (F).
Adaptado de Bernardi et al. (2017, 2019a).

conhecidos (análise do solo, por exemplo), a geração dos mapas de probabilidade destas superfícies ou uma camada *raster*, que são resultados dos valores preditos e seus erros (Grego et al., 2014; Bernardi et al., 2017).

É essencial definir um método de interpolação adequado que otimize a estimativa dos valores desconhecidos, pois existem diversos métodos de interpolação como krigagem, inverso ponderado da distância, vizinho mais próximo, triangulação com interpolação linear, médias móveis, curvatura mínima ou *spline* e polinômio local, entre outros. Enquanto a krigagem tem sido utilizada academicamente, os outros métodos de interpolação são os que mais têm sido utilizados comercialmente para gerar os mapas de prescrição de corretivos e fertilizantes. A principal diferença da krigagem dos métodos de interpolação é que estes desconsideram que as variações das distâncias influenciam no comportamento dos dados. Bernardi et al. (2017) e Santos et al. (2017) discutiram as técnicas de interpolação para geração de mapas de recomendação de calagem e adubação em pastagens.

Os algoritmos de aprendizado de máquina, ou *machine learning*, têm se mostrado técnicas eficientes no campo do mapeamento de atributos do solo e previsão de padrões (Khaledian; Miller, 2020; Nyéki et al., 2021). *Machine learning* é um processo automático de aprendizado por algoritmos eficientes para trabalhar com grandes conjuntos de dados, que pode ser utilizado em mineração de dados, reconhecimento de padrões, regressão e classificação (Khaledian; Miller, 2020; Liakos et al., 2018).

8 APLICAÇÃO DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES EM TAXA VARIÁVEL

A tecnologia de aplicação em taxa variável de insumos, ou *Variable Rate Technology* – VRT, é uma técnica para fornecer insumos de acordo com a necessidade específica de subdivisões de uma área de produção agropecuária, não considerando as características médias da área. Geralmente essa tecnologia é aplicada no manejo dos corretivos e fertilizantes, mas pode ser aplicada também para defensivos agrícolas, irrigação ou semeadura. O objetivo da VRT é otimizar o uso dos insumos (calcário e fertilizantes, por exemplo), mas garantindo o rendimento das culturas.

Com base nos resultados das amostras de solo georreferenciadas, e nas técnicas de geoprocessamento, são elaborados mapas de atributos do solo, e os mapas de prescrição de fornecimento de corretivos e fertilizantes em quantidades distintas para diferentes partes do talhão, de acordo com as necessidades específicas (Bernardi et al., 2004; Resende et al., 2014).

Mas há alguns desafios para implementar a VRF, como por exemplo a decisão se há variação de solo suficiente nas áreas para garantir o investimento na geração dos mapas e aplicação em taxa variável efetivamente. Oliveira et al. (2014) propuseram e validaram um índice de oportunidade para caracterização da variação espacial de parâmetros em diferentes etapas do processo de adoção da AP.

De acordo com Hedley (201%), os fatores que podem limitar a adoção da VRT são clima, topografia, qualidade do solo, tempo para processamento, além das interferências operacionais.

A viabilidade do uso da VRT em sistemas de produção pecuários em diferentes locais foi demonstrada por Gillingham (2001); Fu et al. (2010), Serrano et al. (2014) e Hedley (2015).

Em um sistema ILPF em São Carlos/SP, composto por pastagens de capim Piatã, em rotação com o milho e com árvores de eucalipto, foram utilizadas as ferramentas de AP para manejo da fertilidade do solo conforme descrito por Bernardi et al. (2017; 2019a). As Figuras 4 e 5 indicam, respectivamente, as recomendações para aplicação de corretivo e fertilizante em taxa variável em quatro safras consecutivas. Os resultados indicaram que foi possível reduzir em 89 e 57% as quantidades totais de calcário e supersimples. As doses de totais aplicadas em 30 ha variaram de 54,5 e 27,5 t/ha aplicadas em 2015 para 6,0 e 11,7 t/ha aplicados em 2018, respectivamente.

De acordo com Hedley (2015), serão necessárias mais pesquisas para que considerem o efeito das deposições de urina e fezes dos bovinos na aplicação de fertilizantes em taxas variáveis, pois somente mapeando a deposição variável em um piquete e o comportamento, e dinâmica de pastejo dos animais haverá o entendimento do mapa de rendimento variável de matéria seca, e, portanto, a estratégia de fertilização com N variável.

9 AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO EM TAXA VARIÁVEL

Os aspectos agronômicos, ambientais e econômicos devem ser considerados na análise da sustentabilidade de um sistema de produção. Fu et al. (2010) indicaram que a eficiência do uso de fertilizantes e o manejo agronômico e ambiental podem ser melhorados ajustando as entradas de fertilizantes com base na variabilidade espacial da fertilidade do solo. O retorno econômico da adubação utilizada em sistemas intensivos depende do nível de manejo da propriedade agrícola. O fornecimento de fertilizantes pode ser o principal custo de manutenção da pastagem permanente (Gillingham, 2001). Hedley (2015) indicou que

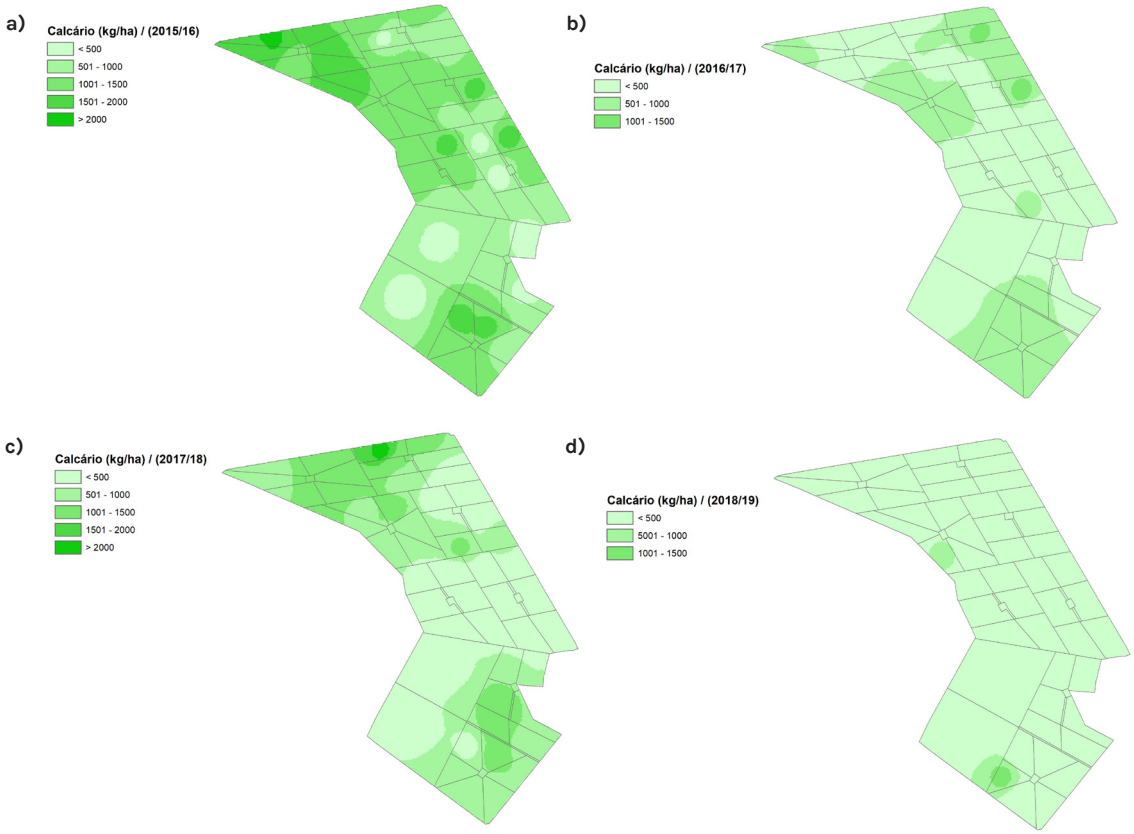


Figura 4. Mapas interpolados de aplicação de calcário em quatro safras: 2015-16 (A), 2016-7 (B), 2017-18 (C), e 2018-19 (D) em sistema integrado em São Carlos/SP.
Adaptado de Bernardi et al. (2019a).

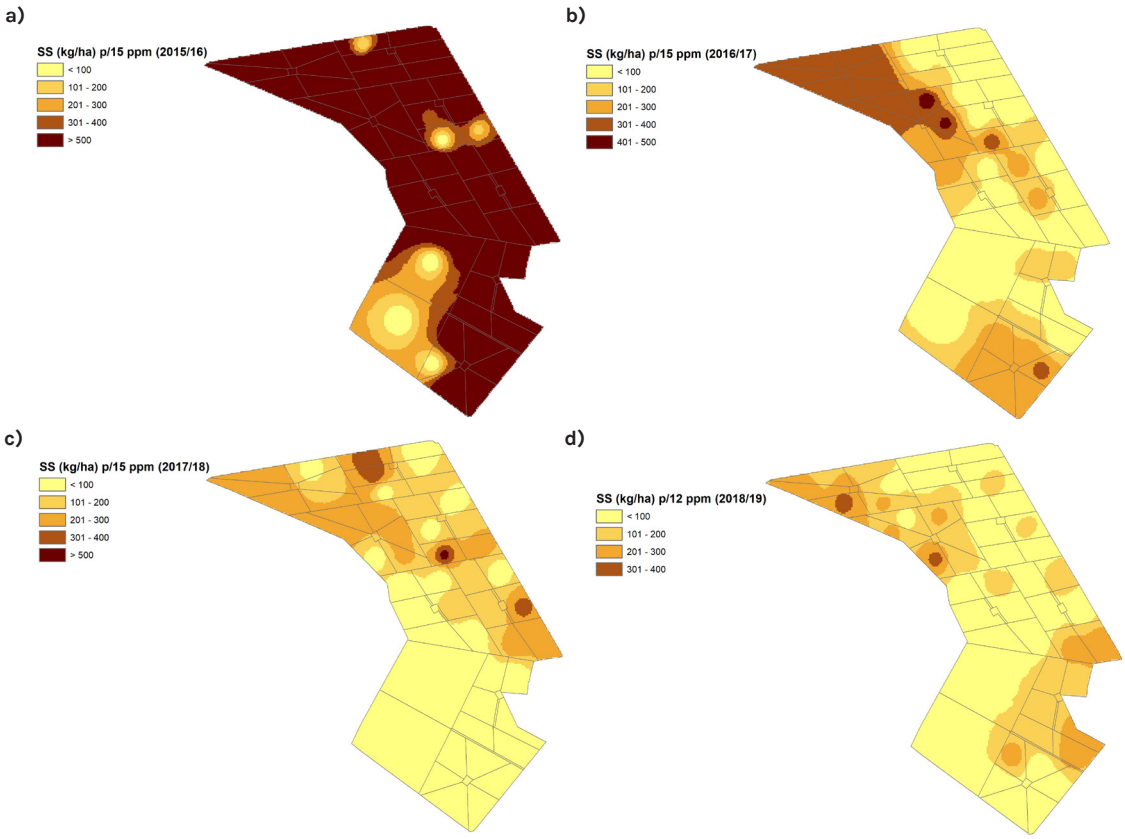


Figura 5. Mapas interpolados de aplicação de superfosfato simples em quatro safras: 2015-16 (A), 2016-7 (B), 2017-18 (C), e 2018-19 (D) em sistema integrado.
Adaptado de Bernardi et al. (2019a).

o retorno financeiro (receita) dos resultados da aplicação das tecnologias da AP é positivo em relação ao investimento (custo) para adoção dessas tecnologias.

O retorno econômico da adubação utilizada em sistemas intensivos depende do nível de manejo da propriedade agrícola. Em um sistema de produção de leite, em pastagem de capim-tanzânia, Bernardi et al. (2018a) mostraram que com o uso de AP foi possível alcançar a homogeneidade dos atributos químicos do solo, e a redução do custo de produção, pela redução do uso de insumos. As quantidades totais de calcário e supersimples foram reduzidas em 95% e 96% entre o 1º e 2º ano com o uso da AP. Em 1,5 ha variaram de 42,1 e 0,5 t/ha aplicadas em 2015 para 2,2 t/ha e 24 kg aplicados no segundo ano, respectivamente (Figura 6).

Bernardi et al. (2016) estudaram a variabilidade da correção do solo e adubação com fósforo e potássio em pastagem de alfafa em um sistema de produção de leite, considerando a variabilidade espacial. Os resultados compararam a produção de matéria seca de forragem e o potencial de produção por vacas leiteiras em sistema de produção com pastagem de alfafa (Figura 7A e B), com a aplicação de corretivos e fertilizantes em VRT para avaliar a eficiência do sistema. Os mapas de aplicação em VRT indicaram que existem áreas em que a necessidade de calcário variava de regiões com menos de 350 kg/ha até outras com mais de 1,5 ton/ha. O fertilizante fosfatado (superfosfato simples) variava de menos de 300 kg/ha até cerca de 800 kg/ha, enquanto o potássico de menos de 100 kg/ha até mais de 500 kg/ha. Os efeitos dessas diferenças nas quantidades necessárias de fertilizantes podem ser observados no custo de produção do sistema (Figura 7G) que variou dentro da mesma área em torno de 7%. A partir das estimativas de produção foi possível calcular a receita (Figura 7H) que apresentou três classes diferentes com variação de 7,7% entre os valores extremos. O lucro (Figura 7I) é oriundo da subtração entre a receita e o custo, e apresentou variações de 9% a 27% dentro da área de produção estudada, que pode indicar o prejuízo ou o sucesso da atividade agropecuária.

Figura 6. Mapas interpolados da aplicação de calcário (A e B) e superfosfato simples (C e D), e dos custos (E e F) em duas safras, de uma pastagem intensiva de capim-tanzânia em sistema de produção intensiva de leite.
Adaptado de Bernardi et al. (2018a).

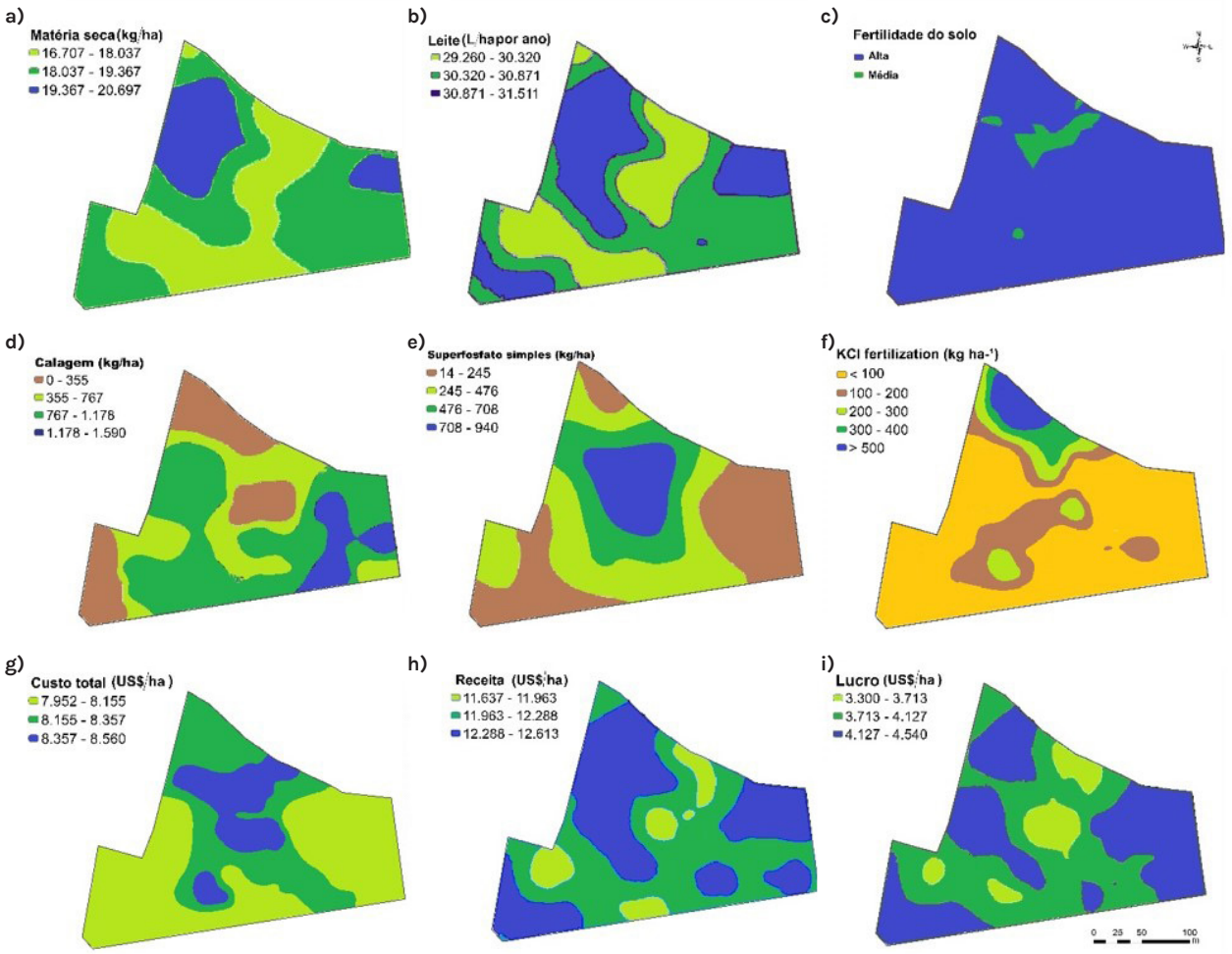


Figura 7. Mapas interpolados do custo (G), receita (H) e lucro (I) de uma pastagem de alfafa em sistema de produção intensiva de leite. Adaptado de Bernardi et al. (2016).

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados mostraram a variabilidade espacial das propriedades do solo e aplicação de calagem e fertilizantes em uma taxa variável, assim como a análise econômica de sistemas de pastagens manejadas intensivamente. A análise espacial das necessidades de calagem e adubação podem fornecer ferramentas de gestão para o manejo de pastagens. E a tecnologia da aplicação de calcário e fertilizante fosfatado à taxa variável pode ser utilizada como ferramenta de correção e adubação do solo, levando à maior homogeneidade dos atributos químicos do solo e contribuindo para melhor retorno econômico do sistema de produção.

REFERÊNCIAS

ADAMCHUK, V. I.; HUMMEL, J. W.; MORGAN, M. T.; UPADHYAYA, S. K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *44*, p. 71-91, 2004.

ALVAREZ VENEGAS, V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez, V. H. (ed.). **Comissão de fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais:** *Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação.* Viçosa: UFV, 1999. p. 25-32.

BERNARDI, A. C. C.; GIMENEZ, L. M.; MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A. Aplicação de fertilizantes a taxas variáveis. In: MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A. (org.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. p. 153-164.

BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; GREGO, C. R.; ANDRADE, R. G.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Ferramentas de agricultura de precisão como auxílio ao manejo da fertilidade do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. *32*, p. 211-227, 2015.

BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; FERREIRA, R. P.; SANTOS, K. E. L.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Spatial variability of soil properties and yield of a grazed alfalfa pasture in Brazil. **Precision Agriculture**, v. 17, p. 737-752, 2016.

BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; MAZZUCO, G. G.; ESTEVES, S. N.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M. Spatial variability of soil fertility in an integrated crop livestock forest system. **Advances in Animal Biosciences**, v. *8*, n. 2, p. 590-593, 2017.

BERNARDI, A. C. C.; BUENO, J. O. A.; LAURENTI, N.; SANTOS, K. E. L.; ALVES, T. C. Efeito da calagem e fertilizantes aplicados à taxa variável nos atributos químicos do solo e custos de produção de pastagem de capim Tanzânia manejadas intensivamente. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. *12*, n. 4, p. 368-382, 2018a.

BERNARDI, A. C. C.; TUPY, O.; SANTOS, K. E. L.; MAZZUCO, G. G.; BETTIOL, G. M.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Mapping of yield, economic return, soil electrical conductivity, and management zones of irrigated corn for silage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. *53*, n. 12, p. 1289-1298, 2018b.

BERNARDI, A. C. C.; LAURENTI, N.; BETTIOL, G. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N.; PEZZOPANE, J. R. M. Otimização do uso de insumos em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com ferramentas de agricultura de precisão. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. *13*, n. 4, p. 290-300, 2019a.

BERNARDI, A. C. C.; PITRAT, T.; RABELLO, L. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; MAZZUCO, G. G.; BETTIOL, G. M. Differences in soil electrical resistivity tomography due to soil water contents in an integrated agricultural system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. *54*, p. e00774, 2019b.

BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; GREGO, C. R.; ANDRADE, R. G.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y. Adubapasto 2.0. **Revista da Propriedade Industrial** (Seção VII Programa de computador), n. 2584, p. 8, 2020. Disponível em: http://revistas.inpi.gov.br/pdf/Programa_de_computador2584.pdf. Acesso em: 11 jun. 2024.

BERNARDI, A. C. C.; INAMASU, R. Y. Adoção da agricultura de precisão no Brasil. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (eds.). **Agricultura de precisão:** *resultados de um novo olhar*. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 559-577.

BERNARDI, A. C. C.; MANTOVANI, E. C. **Contribuição do Portifólio de Automação, Agricultura de Precisão e Digital ao Plano Nacional de Fertilizantes**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2021. 19 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 141).

BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PRIMAVESI, O. Soil fertility of tropical intensively managed forage system for grazing cattle in Brazil. In: *WHALEN, J. K.* **Soil fertility improvement and integrated nutrient management** *- a global perspective.* Rijeka: Intechopen, 2012. p. 37-56.

BERNARDI, A. C. C.; PEREZ, N. B. Agricultura de precisão em pastagens. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão:** *resultados de um novo olhar*. Brasília: Embrapa, 2014. p. 492-499.

BOLFE, E.L.; VICTORIA, D.C.; LUCHIARI JUNIOR, A.; COSTA, C. C.; JORGE, L. A. C. **Tecnologias digitais na pecuária***: aplicações, desafios e expectativas.* Análise da equipe de especialistas. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2021. p. 1-3. (Boletim CiCarne, ano 1, n. 37).

CAMBARDELLA, C. A.; KARLEN, D. L. Spatial analysis of soil fertility parameters. **Precision Agriculture**, v. *1*, p. 5-14, 1999.

CANTARELLA, H.; CORREA, L. A.; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. Fertilidade do solo em sistemas intensivos de manejo de pastagens. In: *SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGENS*, 2002, Piracicaba. **Anais [...]**. Piracicaba: FEALQ. 2002. p. 99-131.

CANTARUTTI, R. B.; MARTINS, C. E.; CARVALHO, M. M. ; FONSECA, D. M.; ARRUDA, M. L.; VILELA, H.; OLIVEIRA, F. T. T. Pastagens. In: Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez, V. H. (eds.). **Comissão de fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais:** *Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação.* Viçosa: UFV, 1999. p. 332-341.

CARDOSO, A. D. S.; BARBERO, R. P.; ROMANZINI, E. P.; TEOBALDO, R. W.; ONGARATTO, F.; FERNANDES, M. H. M. D. R.; RUGGIERI, A. C; REIS, R. A. Intensification: a key strategy to achieve great animal and environmental beef cattle production sustainability in Brachiaria grasslands. **Sustainability**, v. *12*, n. 16, p. 6656, 2020.

CHAGANTI, V. N.; CULMAN, S. W. Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. **Crops & Soils**, v. *51*, n. 1, p. 40-47, 2018.

CLAY, D. E.; CARLSON, C. G. Precision soil sampling. In: CLAY, D. E.; CARLSON, C. G.; CLAY, S. A.; BYAMUKAMA, E. (eds.). **iGrow Corn:** best management practices. USA: South Dakota State University, 2016. p. 21-1-21.6. Disponível em: https://openprairie.sdstate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1003&context=plant_book. Acesso em: 11 jun. 2024.

COLAÇO, A. F.; MOLIN, J. P. **Amostragem georreferenciada**. Piracicaba: ESALQ, 2014. 5 p. (Agricultura de Precisão. Boletim técnico, 02).

CORWIN, D.; LESCH, S. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. *46*, p. 11-43, 2005.

COSTA, K. A. P.; OLIVEIRA, I. P.; FAQUIN, V. **Adubação nitrogenada para pastagens do gênero Brachiaria em solos do Cerrado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 60 p. (Documentos. Embrapa Arroz e Feijão, 192).

DABAS, M. Theory and practice of the new fast electrical imaging system ARP©. In: CAMPANA, S., PIRO, S. (ed.). **Seeing the unseen:** geophysics and landscape archaeology. London: Taylor & Francis, 2008. p. 105-126.

DEMATTÊ, J. A. M.; ALVES, M. R.; GALLO, B. C.; FONGARO, C. T.; SOUZA, A. B.; ROMERO, D. J.; SATO, M. V. Hyperspectral remote sensing as an alternative to estimate soil attributes. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 2, p. 223–232, 2015.

EUCLIDES, V. P. B. VALLE, C. B.; MACEDO, M. C. M.; ALMEIDA, R. G., MONTAGNER, D. B., BARBOSA, R. A. Brazilian scientific progress in pasture research during the first decade of XXI century. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. *39*, p. 151-168, 2010. Supl. especial.

EUCLIDES, V. P. B.; MONTAGNER, D. B. Estratégias para intensificação do sistema de produção. In: ROSA, A. N.; MARTINS. E. N.; MENEZES, G. R. O.; SILVA, L. O. C. (eds.). **Melhoramento genético aplicado em gado de corte:** Programa Geneplus-Embrapa. Brasília: Embrapa; Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2013. p. 49-60.

FILIPPINI ALBA, J. M.; FLORES, C. A.; BERNARDI, A. C. C. Pedology in Precision Agriculture from a Brazilian context. **Revista de Ciencias Agricolas**, v. *40*, n. 3, p. e3216, 2023.

FRIDGEN, J. J.; KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S. T.; WIEBOLD, W. J.; FRAISSE, C. W. Management zone analyst (M.Z.A.). **Agronomy Journal**, v. *96*, n. 1, p. 100-108, 2004.

FU, W.; TUNNEY, H.; ZHANG, C. Spatial variation of soil nutrients in a dairy farm and its implications for site-specific fertilizer application. **Soil & Tillage Research**, v. *106*, p. 185-193, 2010.

GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. **Science**, v. *327*, n. 5967, p. 828-831, 2010.

GILLINGHAM, A. G. Precision management of fertiliser application to pasture. In: AUSTRALIAN GEOSPATIAL INFORMATION AND AGRICULTURE CONFERENCE, 1., 2001, Sydney. **Proceedings [...]**. Sydney: N.S.W. Agriculture, 2001. p. 534-541.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão:** *resultados de um novo olhar.* Brasília: Embrapa, 2014. p. 74-83.

HEDLEY, C. The role of precision agriculture for improved nutrient management on farms. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. *95*, p. 12-19, 2015.

KHALEDIAN, Y.; MILLER, B. A. Selecting appropriate machine learning methods for digital soil mapping. **Applied Mathematical Modelling**, v. *81*, p. 401-418, 2020.

LABORATÓRIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E GEOPROCESSAMENTO. **Atlas Digital das Pastagens Brasileiras**, 2020. Disponível em: http://atlasdaspastagens.ufg.br/. Acesso em: 11 jun. 2024.

LIAKOS, K. G.; BUSATO, P.; MOSHOU, D.; PEARSON, S.; BOCHTIS, D. Machine learning in agriculture: a review. **Sensors**, v. *18*, n. 8, p. 1-29, 2018.

LOPEZ, B.; HINES, P. J.; ASH, C. The unrecognized value of grass. **Science**, v. *377*, p. 590-591, 2022.

MACEDO, M. C. M. Análise comparativa de recomendações de adubação em pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE O MANEJO DA PASTAGEM, 21., 2004, Piracicaba. **Anais [...]**. Fertilidade do solo para pastagens produtivas. Piracicaba: Fealq, 2004. p. 317-355. Fertilidade do solo para pastagens produtivas" é o tema do 21 Simpósio sobre manejo de pastagem, ocorrido em 2004.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; VALENCIA, L. I. O.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; SILVA, C. A.; ANDRADE, A. G.; MADARI, B. E.; MEIRELLES, M. S. P. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de latossolo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. *41*, p. 1023-1031, 2006.

MARTHA JÚNIOR, G. B.; VILELA, L.; BARIONI, L. G.; SOUSA, D. M. G. Manejo da adubação nitrogenada em pastagens. In: PEDREIRA, C. G. S.; MOURA, J. C.; FARIA, V. P. **Fertilidade do solo para pastagens produtivas.** Piracicaba: Fealq, 2004. p. 101-138.

MCBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. *117*, p. 3-52, 2003.

MOLIN, J. P.; TAVARES, T. R. Sensor systems for mapping soil fertility attributes: challenges, advances, and perspectives in Brazilian tropical soils. **Engenharia Agrícola**, v. *39*, p. 126-147, 2019.

MORAL, F.; TERRÓN, J.; MARQUES DA SILVA, J. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil & Tillage Research**, v. *106*, p. 335-343, 2010.

NANNI, M. R.; POVH, F. P.; DEMATTÊ, J. A. M.; OLIVEIRA, R. B. D.; CHICATI, M. L.; CEZAR, E. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. **Scientia Agrícola**, v. *68*, p. 386-392, 2011.

NYÉKI, A.; KEREPESI, C. B. D.; BENCZÚR, A.; NAGY, G. M. J. Application of spatio-temporal data in site - specific maize yield prediction with machine learning methods. **Precision Agriculture**, v. *22*, p. 1397-1415, 2021.

OLIVEIRA, P. P. A.; BERNARDI, A. C. C.; SANTIAGO, R. R.; SILVA, R. F. **Software adubapasto 1.0 para recomendação de calagem e adubação para sistemas de pastejo intensivo**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2010. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 98).

OLIVEIRA, R. P.; BRANDAO, Z. N.; BERNARDI, A. C. C.; PEREZ, N. B.; FRANCHINI, J. C.; BENITES, V. M.; SANTI, A.; GEBLER, L.; BASSOI, L. H.; ALBA, J. M. F.; SHIRATSUCHI, L. S. Sistematização do índice de oportunidade na adoção da agricultura de precisão para diferentes sistemas produtivos. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (eds.). **Agricultura de precisão:** *resultados de um novo olhar.* Brasília, DF : Embrapa, 2014. p. 173-179.

OLSON, R. A.; ANDERSON, F. N.; FRANK, K. D.; GRABOUSKI, P. H.; REHM, G. W.; SHAPIRO, C. A. Soil testing interpretations: Sufficiency vs. build-up and maintenance. In: Brown, J.R. (ed.). **Soil Testing:** *Sampling, Correlation,*

Calibration, and Interpretation. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1987. p. 41-52.

PRIMAVESI, A. C.; PRIMAVESI, O.; CORRÊA, L. A.; CANTARELLA, H.; SILVA, A. G.; FREITAS, A. R.; VIVALDI, L. J. Adubação nitrogenada em capim-coastcross: efeitos na extração de nutrientes e recuperação aparente do nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. *33*, n. 1, p. 68-78, 2004.

PRIMAVESI, A. C.; ANDRADE, A. G.; ALVES, B. J. R.; ROSSO, C.; BATISTA, E. M.; PRATES, H. T.; ORTIZ, F. R.; MELLO, J.; FERRAZ, M. R.; LINHARES, N. W.; MACHADO, P. L. O. A.; MOELLER, R.; ALVES, R. C. S.; SILVA, W. M. Métodos de análise de solo. In: NOGUEIRA, A. R. A.; SOUZA, G. B. **Manual de laboratórios:** *solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos.* São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. p. 67-130.

PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C.; CAMARGO, A. C. Conhecimento e controle, no uso de corretivos e fertilizantes, para manejo sustentável de sistemas intensivos de produção de leite de bovinos a pasto. **Revista de Agricultura**, v. *74*, p. 249-266, 1999.

RESENDE, A. V.; SHIRATSUCHI, L. S.; COELHO, A. M.; CORAZZA, E. J.; VILELA, M. de F.; INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C.; BASSOI, L. H.; NAIME, J. M. Agricultura de precisão no Brasil: avanços e impactos no manejo e na conservação do solo, na sustentabilidade e na segurança alimentar. In: Leite, L. F. C.; Maciel, G. A.; Araújo, A. S. F. (ed.). **Agricultura conservacionista no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 468-488.

SAMOUËLIAN, A., COUSIN, I., TABBAGH, A., BRUAND, A., RICHARD, G. Electrical resistivity survey in soil science: a review. **Soil & Tillage Research**, v. *83*, p. 173-193, 2005.

SANTOS, K. E. L.; BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; CRESTANA, S. Geoestatística e geoprocessamento na tomada de decisão do uso de insumos em uma pastagem. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. *11*, n. 3, p. 294-307, 2017.

SANTOS, P. M.; EUCLIDES, V. P. B. **Demandas para pesquisa e desenvolvimento para pastagens no Brasil**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2022. (Embrapa Pecuária Sudeste, Série Documento).

SCHELLBERG, J.; HILL, M. J.; GERHARDS, R.; ROTHMUND, M.; BRAUN, M. Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. **European Journal of Agronomy**, v. *29*, p. 59-71, 2008.

SERRANO, J.; PEÇA, J.; SILVA, J. M.; SHAHIDIAN, S.Avaliação de tecnologias para aplicação diferenciada de fertilizantes: novos conceitos de gestão em pastagens permanentes. **Revista de Ciências Agrárias**, v. *37*, p. 253-269, 2014.

SOBRAL, L. F.; BARRETO, M. C. V.; SILVA, A. J.; ANJOS, J. L. **Guia prático para interpretação de resultados de análises de solos**. Aracaju, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. 15 p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 206).

VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Interpretação de resultados de análise de solo. In: VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (eds.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996. p. 8-13 (IAC, Boletim Técnico, 100).

VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres; Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1991. 343 p.

VILELA, L.; SOARES, W. V.; SOUSA, D. M. G. de; MACEDO, M. C. M. Calagem e adubação parapastagens. In: SOUSA, D. M. G; LOBATO, E. (ed.). **Cerrado:** correção do solo e adubação. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p. 367-382.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; BOUMA, J. Soil sensing: a new paradigm for agriculture. **Agricultural Systems**, v. *148*, p. 71-74, 2016.

WERNER, J. C.; PAULINO, V. T.; CANTARELLA, H. Recomendação de adubação e calagem para forrageiras. In: RAIJ, B. VAN; SILVA, N. M.; BATAGLLA, O. C.; QUAGGIO, J. A.; HIROCE, R.; CANTARELLA, H.; BELLLNAZZI, JR., R.; DECHEN, A. R.; TRANI, P.E. **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996. p. 263-271 (IAC, Boletim Técnico, 100).

78

Sistemas automatizados de ordenha no Brasil: panorama e percepções

Automated milking systems in Brazil: Overview and Perceptions

Jaciara Diavão [1], Abias Santos Silva [2], Rebeca Ribeiro Silvi[3], Vanessa Amorim Teixeira[4], Thierry Ribeiro Tomich[5], Claudio Antônio Versiani Paiva[6], Mariana Magalhães Campos[7], Fernanda Samarini Machado[8], Rafael Ehrich Pontes Ferreira[9], João Ricardo Rebouças Dórea[10], Luiz Gustavo Ribeiro Pereira[11]

[1] *Pós-doutorando, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, jacidiavao@gmail.com*
[2] *Pós-doutorando, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, abias.severo@gmail.com*
[3] *Doutora em Ciência Animal, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus (BA), Brasil, rebecasilvy@yahoo.com.br*
[4] *Doutora em Zootecnia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG), Brasil, vanessateixeiraamorim@gmail.com*
[5] *Pesquisador, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, thierry.tomich@embrapa.br*
[6] *Pesquisador, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, claudio.paiva@embrapa.br*
[7] *Pesquisador, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, mariana.campos@embrapa.br*
[8] *Pesquisador, Pesquisador, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, fernanda.samarini@embrapa.br*
[9] *Estudante de Doutorado, Animal and Dairy Sciences Department, University of Wisconsin, Madison (WI), EUA, referreira@wisc.edu*
[10] *Professor Assistente, Animal and Dairy Sciences Department, University of Wisconsin, Madison (WI), EUA, joao.dorea@wisc.edu*
[11] *Pesquisador, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, luiz.gustavo@embrapa.br*

RESUMO

O crescente interesse na adoção de sistema de ordenha robotizada (SOR) para melhorar a utilização da mão de obra, maximizar a produtividade e aumentar o bem-estar do produtor e das vacas é perceptível no Brasil e no mundo. O objetivo deste estudo foi quantificar e avaliar o perfil das fazendas que utilizaram o SOR no Brasil em 2019/2021. Fatores, como disposição para investir em SOR, métricas de SOR, perfil do agricultor, características da fazenda e índices de produção, foram levantados. As fazendas que adotaram SOR no Brasil estão localizadas nas regiões Sul (83,5%), Sudeste (12,3%) e Centro-Oeste (4,11%), distribuídas em 65 municípios, representados por 73 fazendas e 143 equipamentos instalados. A grande maioria das propriedades brasileiras adota o sistema confinado tipo freestall e 70,7% das fazendas usam sistema de tráfego livre. As fazendas que usam SOR apresentam média de 31 kg de leite por dia, 55,8 vacas/robô, com 2,9 ordenhas por dia, nas quais 5,51% das vacas necessitam de intervenção para direcionamento forçado aos equipamentos de ordenha. Houve redução de 1,0 colaborador (não familiar) com a instalação do SOR nas fazendas brasileiras. Os três principais fatores que influenciaram a adoção do SOR no Brasil foram: 1) melhorar a qualidade de vida (4,59); 2) aumentar a produção de leite (4,48), e 3) aumentar a flexibilidade de mão de obra (4,44). Por outro lado, os principais entraves para adoção da tecnologia foram: dependência de eletricidade e sistema de internet, e alto investimento inicial. A adoção do SOR reduz a força de trabalho na ordenha e o tempo gasto nas atividades relacionadas à ordenha. Em geral, as métricas brasileiras de equipamentos SOR são semelhantes às de fazendas em outros países. Os robôs estão concentrados nas regiões onde se encontram as grandes bacias leiteiras brasileiras, provavelmente em função do maior nível de intensificação e automação das fazendas, e da grande oferta de serviços de assistência técnica. Para resultados positivos do sistema, são necessários: um conjunto de boas práticas de manejo; conhecer outras propriedades que adotam o sistema (seus erros e acertos), e investir na infraestrutura das instalações e na genética do rebanho, visando à melhora da conformação do úbere e dos tetos.

Palavras-chave: vacas; sensor; pecuária; robótica.

ABSTRACT

The growing interest in adopting automatic milking systems (AMS) to improve the use of labor, maximize productivity and increase the quality of life of the producer and cows is noticeable both within Brazil and globally. This study aimed to quantify and evaluate the profile of farms that used AMS in Brazil in 2019/2021. Factors such as willingness to invest in AMS, AMS metrics, farmer profile, farm characteristics, and production rates were

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000060

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

surveyed. The farms that adopted AMS in Brazil are located in the South (83.5%), Southeast (12.3%), and Central-West (4.11%) regions, distributed in 65 municipalities, represented by 73 farms and 143 pieces of equipment installed. Most Brazilian properties use the free-stall confined system, and 70.7% of the farms use the free-traffic system. The farms that use AMS have an average of 31 kg of milk per day, 55.8 cows/robot, with 2.9 milkings per day, and 5.51% of cows needing to be actively guided to the milking equipment. There was a reduction of 1.0 employees (non-family members) with the installation of SOR on Brazilian farms. The three main factors that influenced the adoption of AMS in Brazil were 1) improving quality of life (4.59), 2) increasing milk production (4.48), and 3) increasing labor flexibility (4.44). Conversely, the main obstacles to adopting the technology were dependence on electricity and the internet and high initial investment. Adopting AMS reduces the milking workforce and the time spent on milking-related activities. Brazilian metrics for AMS equipment are similar to farms in other countries. The robots are concentrated in the regions where the large Brazilian dairy basins are located, probably due to the greater level of intensification and automation of the farms and the significant availability of technical assistance services. For positive results from the system, it is necessary to have a set of good management practices, to know other properties that adopted the system (their mistakes and successes), to invest in the infrastructure of the facilities and the genetics of the herd, and to improve the compatibility of the udder and teats.

Keywords: cattle; sensor; livestock; robotic.

1 INTRODUÇÃO

No sistema de ordenha robotizada (SOR), a ordenha ocorre de forma voluntária, com o acesso da vaca à sala de ordenha sem interferência humana (Ferland et al., 2016; Tse et al., 2017; Silvi et al., 2018). Nesse tipo de sistema, o robô apresenta um braço mecânico que, ao detectar o posicionamento do teto da vaca, por um sistema de laser ou câmera, realiza a colocação e retirada das teteiras (Maculan; Lopes, 2016). O sistema é composto de dispositivos que detectam a entrada e a saída das vacas, realiza a limpeza do úbere, registra a produção de leite, realiza o diagnóstico de mastite e a desinfecção dos tetos pós-ordenha, tornando desnecessária a presença de um ordenhador dentro das instalações (Rossing et al., 1997).

O processo de ordenha automatizada é diferente da ordenha convencional na frequência, no intervalo e na distribuição diária de procedimentos de ordenha, limpeza e desinfecção dos tetos. Portanto, o SOR é um sistema de manejo de ordenha no qual alimentação, tráfego das vacas, comportamento e bem-estar animal devem ser levados em consideração para permitir seu uso eficiente (Svennersten-Sjaunja; Pettersson, 2008). Dentre as vantagens desse sistema, destacam-se a otimização da produção de leite, o maior conforto e a melhoria na saúde da vaca (Tse et al., 2017), além da flexibilidade do uso da mão de obra.

O crescente interesse no SOR para reduzir a mão de obra, maximizar a produtividade e aumentar o bem-estar animal e do produtor é perceptível em vários países (Bach; Cabrera, 2017). As principais razões que levam os produtores à adoção de SOR são: substituição do ordenhador pelo equipamento autônomo, o que permite a flexibilidade dos horários das ordenhas diárias; maior bem-estar aos produtores; redução da mão de obra; aumento da produção de leite, pela maior quantidade de ordenhas por dia; fornecimento de várias informações em tempo real para melhorar o manejo geral do rebanho; redução dos custos com mão de obra, e promoção de maior controle das atividades. Informações sobre adoção, percepção e eficácia do uso de SOR em fazendas leiteiras podem gerar conhecimentos sobre os desafios que precisam ser abordados por pesquisas científicas, setor produtivo e empresas privadas, para melhorar o uso do SOR no Brasil.

O objetivo deste estudo foi quantificar e compreender o perfil das fazendas que utilizaram o SOR no Brasil em 2019/2021. Fatores, como disposição para investir em SOR, métricas de SOR, perfil do agricultor, características da fazenda e índices de produção, foram levantados.

2 PANORAMA DO USO DE EQUIPAMENTOS AUTOMATIZADOS DE ORDENHA

A adoção de SOR requer investimento mais elevado em relação aos sistemas convencionais (Shortall et al., 2016). Ademais, requer adequação dos produtores à gestão baseada em dados gerados pelo sistema (Tse et al., 2017). Além disso, a rentabilidade ou a redução do uso da mão de obra com a adoção do SOR varia de acordo com a capacidade de gestão do produtor (Salfer et al., 2017).

A tecnologia de ordenha robotizada é relativamente recente, sendo os primeiros equipamentos instalados em 1992 (Bach; Cabrera, 2017). Mais de 10 mil equipamentos foram instalados em todo mundo em 2011 (de Koning, 2011) e, menos de uma década depois, mais de 35 mil já estavam em funcionamento (Salfer et al., 2017).

A maior parte das fazendas que adotam o sistema é de caráter familiar, possuem mais de um robô e estão localizadas principalmente no norte da Europa (de Koning, 2011), com cerca de 90% dos equipamentos instalados; há ainda 9% no Canadá e outros países representando 1% (de Koning, 2010).

O Brasil apresenta diversas características socioeconômicas que se tornaram impedimento ou agente facilitador da adoção de SOR. O primeiro SOR foi instalado em 2012 e atualmente existem mais de 200 SORs em funcionamento nas fazendas brasileiras. Os equipamentos SORs estão localizados em apenas três regiões do Brasil; Sul, Sudeste e Centro-Oeste (Figura 1).

A concentração nessas regiões se dá pela existência de bacias leiteiras, com maior presença de indústrias laticinistas, além de maior poder econômico dessas regiões que investem no setor agropecuário, principalmente a região Sul. O custo do investimento em SOR é bastante elevado, com expectativa de retorno do investimento de 8 a 10 anos (Maculan; Lopes, 2016). Ademais, o SOR demanda suporte técnico especializado e a presença das empresas fabricantes dos equipamentos nessas regiões tornou a manutenção viável no Brasil.

O SOR, no Brasil, está distribuído em 65 municípios, representados por 73 fazendas e 143 equipamentos instalados provenientes de quatro empresas. As fazendas que utilizam SOR no Brasil têm, em sua maioria, mão de obra familiar, e são caracterizadas por pequenas propriedades (Tabela 1). A produção de leite nas fazendas variou de 1.100 a 9.625 kg/dia, com média de 3.613 kg/dia, com rebanho (vacas em lactação) de 48 a 350 vacas.

Fazendas de pequeno porte representam quase 80% das propriedades que utilizam SOR. Essas fazendas apresentam mão de obra familiar, sendo este um dos principais motivos de aquisição de SOR, já que, nessas propriedades, o número de funcionários é reduzido. Contudo, essa redução da mão de obra apenas é possível quando o número de animais que não irão para o SOR voluntariamente também é reduzido (Jacobs; Siegford, 2012). No Brasil, 5,51% das vacas necessitam ser assistidas para serem levadas até a ordenha, valor considerado baixo e não limitante para adoção de SOR.

A grande maioria das propriedades brasileiras que adotam SOR utiliza sistema confinado do tipo freestall (55,6%) e 70,7% das fazendas usam sistema de trânsito livre até o SOR. Nas fazendas brasileiras, a média de utilização de concentrado durante a ordenha é de 5,42 kg, chegando até a 8 kg (Silvi et al., 2021). Unal et al. (2017) compararam o desempenho de uma fazenda com sistema de tráfego livre e duas fazendas utilizando o tráfego guiado (com portões de separa-

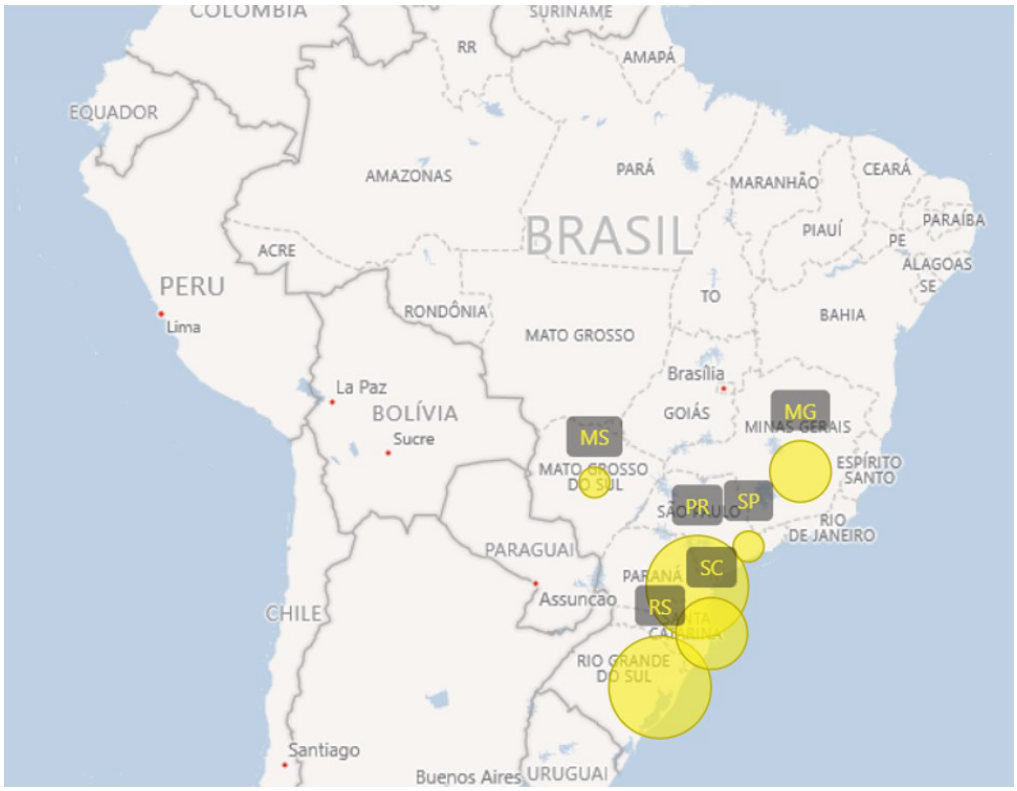


Figura 1. Perfil da utilização de SOR em fazendas leiteiras no Brasil.

ção inteligentes). Os autores relataram que o tempo gasto buscando as vacas para a ordenha e o número de recusas do robô foram menores nas fazendas com fluxo guiado, sugerindo que, nesse sistema, mais vacas podem ser ordenhadas por robô, sem comprometer o desempenho. No presente levantamento, a maior parte dos respondentes utiliza SOR de empresa que não adota portões inteligentes, justificando a maior adoção de sistemas de tráfego livre no presente levantamento.

3 VARIÁVEIS ASSOCIADAS AO USO DE ORDENHA ROBOTIZADA NO BRASIL

As fazendas brasileiras que utilizam SOR se caracterizam por rebanho médio de 114 vacas em lactação, produção anual de 1.100 a 9.625 kg e média diária de 31 kg por vaca (Tabela 2).

A transição de uma sala de ordenha convencional para uma ordenha robotizada resulta em grandes mudanças tanto para o produtor quanto para as vacas. Mesmo que a supervisão das atividades de ordenha seja eliminada, novas tarefas de trabalho, como o controle e a limpeza do sistema, bem como o controle visual e a busca das vacas que excederem o intervalo máximo de ordenha, se tornam necessárias (de Koning, 2011).

No Brasil, houve redução de 1,0 colaborador (não familiar) com a instalação do SOR. Uma das razões para a redução no quadro de funcionários é que grande parte das fazendas participantes da pesquisa se caracteriza como propriedade familiar. Nessa situação, a principal intenção do proprietário é reduzir a mão de obra familiar, antes de reduzir o número de funcionários. O número de funcionários foi reduzido em 64% das fazendas, permaneceu o mesmo em 16% e au-

Tabela 1. Perfil das propriedades que utilizam SOR no Brasil.

Tamanho da propriedade (ha)	%	Sistema de produção	%	Sistema de tráfego	%	Raça utilizada	%
1 a 50	40,7	Freestall	55,5	Livre	70,7	Holandês	77,7
50 a 100	14,8	Composto	37,0	Leite primeiro	14,8	Jersey	18,5
100 a 500	37,0	Freestall/Composto	3,70	Alimentação primeiro	11,1	Holandês/Jersey	3,70
> 1.000	7,41	Pasto	3,70	Guiado	3,70	-	-

Tabela 2. Métricas de eficiência na utilização de sistemas de ordenhas robotizadas nas fazendas brasileiras[1].

Variáveis	Brasil	
	Média	DP[3]
Vacas em lactação, n	114	±66,9
Robô/fazenda, n	2,2	±1,4
Vacas/robô, n	55,8	±14,4
Ordenhas, vaca/dia	2,9	±0,4
PL[2], kg/dia	3.613	±2.149
PL/robô, kg/dia	1.781	±674
Vacas assistidas, n	10	±19
Ordenhas com falha, n	4,9	±5,2
Tempo gasto com atividades de ordenha (antes da SOR), hora	4,5	±4,4
Tempo gasto com atividades de ordenha (depois da SOR), hora	1,5	±1,9
Trabalhadores (antes da SOR), n	3,6	±2,3
Trabalhadores (depois da SOR), n	2,5	±2,0

[1]Adaptado de Silvi et al. (2021); [2]PL: produção de leite; [3]DP: desvio padrão.

mentou em 12% das propriedades (Silvi et al., 2021). Tse et al. (2018), em estudo no Canadá, observaram redução de 20% e 62% no número de colaboradores e tempo gasto para atividades relacionadas com a ordenha, respectivamente.

Nas propriedades em que houve a transição do sistema convencional para SOR (87%), o tempo dedicado às atividades relacionadas à ordenha (preparação e limpeza do robô, busca das vacas, limpeza da sala de ordenha e movimentação das vacas para o curral em sistemas convencionais de ordenha) diminuiu (66%) com a adesão ao SOR. A redução no tempo dedicado às atividades relacionadas à ordenha após a transição para o SOR foi próxima à economia de trabalho relacionado às atividades de ordenha em 75% das fazendas nos Estados Unidos (Bentley et al., 2013).

Houve aumento da produção de leite com a utilização do SOR, sem grandes mudanças na composição e qualidade do leite, no número de colaboradores e no tempo dedicado às atividades relacionadas à ordenha, após a transição para o SOR no Brasil. Contudo, o trabalho se torna mais baseado em registro, coleta e análise de dados, com a utilização do SOR (Butler et al., 2012), e provavelmente algum tempo economizado no trabalho de ordenha seja transferido para um trabalho mais orientado por computador, o que pode tornar o trabalho menos oneroso, com melhora da qualidade de vida do produtor. A comparação entre variáveis de ordenhabilidade das fazendas que utilizam SOR no Estados Unidos, Canadá, Europa e Brasil encontra-se na Tabela 3.

A produção média de leite de 31 kg/vaca/dia é maior que as registradas em fazendas leiteiras utilizando SOR na Europa (28 kg/vaca/dia) (Sitkowska et al., 2017) e menor que a registrada no Canadá e Estados Unidos (32 kg/dia) (Tremblay et al., 2016; Tse et al., 2018). As fazendas no Brasil operam com um número médio de vacas dentro da recomendação de 60 vacas por robô (Deming et al., 2013). Segundo os autores, manter a densidade dentro dos valores ideias não compromete o intervalo entre ordenhas e, consequentemente, a produção de leite do rebanho, principalmente em sistemas com tráfego livre.

A média de vacas por robô no Brasil é semelhante à observada em fazendas europeias (55 vacas/robô) (Piwczyński et al., 2020) e maior que a registrada em fazendas no Canadá (51 vacas/robô) (Tse et al., 2018) e Estados Unidos (50 vacas/robô). Como a instalação de SOR no Brasil é mais recente, o maior número de vacas por robô em relação aos Estados Unidos está associado à utilização de SORs mais modernos e eficientes. O maior número de vacas por robô resultou também em maior produção de leite por robô no Brasil, quando comparada à produção dos demais países.

4 FATORES QUE INFLUENCIAM E LIMITAM A ADOÇÃO DE ORDENHA ROBOTIZADA PELOS PRODUTORES

É cada vez maior o número de produtores que adotam sistemas de ordenha robotizada ao redor do mundo. E os principais motivos para adesão a essa tecnologia são de caráter social e econômico, visando a aumento da produção de leite e flexibilidade e redução da mão de obra (Hansen, 2015; Ferland et al., 2016; Drach et al., 2017).

Os três principais fatores que influenciaram a adoção do SOR no Brasil pelos produtores foram: 1) melhorar a qualidade de vida; 2) aumentar a produção de leite, e 3) aumentar a flexibilidade da mão de obra (Silvi et al., 2021) (Figura 2).

Pesquisas indicam que a flexibilidade e a eficiência do trabalho consistem nas principais razões para os produtores instalarem ordenhas robotizadas (Hansen, 2015; Drach et al., 2017). Em 2014, 213 fazendas leiteiras canadenses, que trocaram os sistemas convencionais por robotizados, observaram redução na carga de trabalho de 15 horas por vaca/ano (Ferland et al., 2016). Além de contribuir para o bem-estar e saúde dos produtores, a redução da mão de obra contribuiu para o aumento da rentabilidade das fazendas.

Tabela 3. Eficiência na utilização de sistemas de ordenhas robotizadas nas fazendas no Brasil e no mundo.

País[1]	EUA	Canadá	Austrália	Espanha	França	Alemanha	Holanda	Brasil
Fazendas, n	635	41	8	29	-	-	-	27
PL[2], kg/vaca/dia	32,7	34,5	24,7	28,5	28,4	27,4	28,0	31,0
Vacas/robô, n	50,5	49,4	51,0	52,7	53,5	58,9	53,0	55,2
PL/robô, kg/dia	1.666	1.685	1.263	1.501	1.461	1.538	1.430	1.724
Ordenha/vaca, n	2,9	3,0	2,3	2,7	2,5	2,6	2,7	2,9

[1]Adaptado de Castro et al. (2012); King et al. (2016); Lyons e Kerrisk (2017); Piwczyński et al. (2020); Silvi et al. (2021); Tremblay et al. (2016);
[2] PL: produção de leite.

Figura 2. Fatores que influenciaram na adoção de SOR. 1: pouco relevante - 5: muito relevante.

A limitação observada para adoção desse sistema refere-se às grandes mudanças nos processos de manejo e adaptação dos animais, e o primeiro ano de transição para o SOR pode acarretar em trabalho extra na gestão do sistema (de Koning, 2011). No entanto, existe uma mudança na natureza do trabalho, que deixa de ser físico, com o equipamento de ordenha pelo ordenhador, e passa a ser atividade de gestão, como controle dos dados gerados pelo robô. Este trabalho leva menos tempo e torna o operacional de mão de obra mais flexível, o que é interessante para a agricultura familiar. Porém, a limitação gerada pelo sistema é a demanda de uma pessoa quase que exclusiva para monitorar o funcionamento do robô, já que a sua atividade depende de sistema sem fio.

A maioria dos produtores está satisfeita com a decisão de instalar o SOR (Hansen, 2015; Ferland et al., 2016; Tse et al., 2017). Embora a satisfação ainda seja baseada totalmente nos retornos econômicos, a melhoria no estilo de vida dos produtores é considerada um fator importante para a grande aceitação e o crescimento da adoção desse sistema.

Ainda que a ordenha robotizada seja opção atraente para alguns produtores, devem-se considerar alguns fatores, como disponibilidade de mão de obra qualificada, estilo de vida desejado pelo produtor, interesse em tecnologia, exigência de investimento inicial de capital e, principalmente, a rentabilidade, quando se pretende investir em tecnologia de automação do processo de ordenha (Silvi et al., 2018).

Outro ponto importante para o sucesso na adoção do SOR para a saúde animal é o controle da mastite. Segundo Hovinen e Pyorala (2011), a detecção da mastite clínica e subclínica, e a consequente decisão com relação ao tratamento e à segregação, são um desafio para o SOR, uma vez que a presença de um responsável atento à interpretação dos dados de saúde do úbere do rebanho continua imprescindível, assim como para os sistemas convencionais de ordenha.

Existem algumas limitações para o uso do SOR (Silvi et al., 2021). A principal causa de descarte de vacas durante a transição para o SOR foi o reconhecimento dos tetos devido à conformação do teto ou úbere pelo SOR (57%), aos problemas de adaptação ao SOR (34%) e ao comportamento preguiçoso das vacas no sistema (9%). Jacobs e Siegford (2012) associaram aspectos comportamentais ou de conformação como os principais fatores de descarte. Ainda segundo os autores, a posição indesejável dos tetos e a variação do tamanho do quarto do úbere criam dificuldades para a fixação das teteiras no SOR. Em uma pesquisa com 15 produtores de leite norte-americanos, todos relataram dificuldades com variações dos tetos e fixação da teteira, resultando em até três descartes extras por ano em rebanhos com média de 94 vacas (Rodenburg, 2002).

Outros cuidados, como o planejamento das instalações, devem ser levados em consideração para adoção do SOR. Os layouts de SOR devem ser projetados com vias largas, cruzamentos múltiplos que possibilitem rotas de escape, equipamentos de limpeza do piso e troca das camas, de forma que apenas uma pessoa possa desempenhar todas as atividades de manejo e manuseio do robô, quando e se for necessário. Quanto ao número de robôs em uma instalação com SOR, manter grupos pequenos com acesso a apenas uma máquina pode facilitar a identificação das vacas que podem ser ordenhadas. Contudo, o acesso a dois robôs reduz o tempo de espera, com menos interrupções de lavagem ou de manutenção (Rodenburg, 2017).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O número de fazendas com SOR no Brasil aumentou significativamente desde 2012. Os robôs estão concen-

trados nas regiões onde se encontram as grandes bacias leiteiras, provavelmente em função do maior nível de intensificação e automação das fazendas, e da grande oferta de serviços de assistência técnica. A introdução do SOR trouxe mudanças positivas na qualidade de vida dos proprietários, principalmente em fazendas com mão de obra familiar. A ordenha voluntária permitiu aos produtores maior tempo livre para desenvolver outras atividades, sobretudo as relacionadas à gestão do sistema. Os produtores observaram redução no número de funcionários e no tempo dedicado às atividades relacionadas à ordenha. A maior parte dos produtores recomendam o SOR e consideram a adoção ao sistema uma estratégia de sucesso. Para resultados positivos do sistema, são necessários: boas práticas de manejo, conhecer outras propriedades que adotam o sistema (seus erros e acertos) e investir na infraestrutura das instalações e na genética do rebanho, visando à melhora da conformação do úbere e dos tetos.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa; a Guilherme Fernando Mattos, Castrolanda, Paraná; a Renê Granato, COTRIJAL, Rio Grande do Sul; a Christiano Nascif, Labor Rural, Minas Gerais; a Marcelo Pereira de Carvalho, Milkpoint, São Paulo; à Associação Brasileira dos Criadores de Girolando, e à Associação dos Criadores de Gado Holandês de Minas Gerais, Minas Gerais, pelo apoio na aplicação da pesquisa. Um agradecimento especial aos 448 produtores de leite brasileiros que dedicaram tempo para responder à pesquisa.

REFERÊNCIAS

BACH, A.; CABRERA, V. Robotic milking: feeding strategies and economic returns. **Journal of Dairy Science**, v. *100*, n. 9, p. 7720-7728, 2017. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2016-11694.

BENTLEY, J. A.; TRANEL, L. F.; TIMMS, L. L.; SCHULTE, K. Automatic milking systems (AMS)-Producer Surveys. **Animal Industry Repor***t*, v. *659*, n. 1, p. 1-3, 2013.

BUTLER, D.; HOLLOWAY, L.; BEAR, C. The impact of technological change in dairy farming: robotic milking systems and the changing role of the stockperson. **Royal Agricultural Society of England**, v. *173*, p. 1-6, 2012.

CASTRO, A.; PEREIRA, J. M.; AMIAMA, C.; BUENO, J. Estimating efficiency in automatic milking systems. **Journal of Dairy Science**, v. *95*, n. 2, p. 929-936, 2012. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2010-3912.

DE KONING, C.J.A.M. (Kees) Automatic milking—Common practice on dairy farms. In: NORTH AMERICAN CONFERENCE ON PRECISION DAIRY MANAGEMENT, PROGRESSIVE DAIRY OPERATORS, 1., 2010, Guelph, ON, Canada. **Proceedings** [...]. Toronto, Wageningen Academic Publishers, 2010. p. 52-67.

DE KONING, K. Automatic milking: common practice on over 10,000 dairy farms worldwide. In: DAIRY RESEARCH FOUNDATION SYMPOSIUM, 2011, Sydney. **Proceedings** [...]. Sydney: University of Sydney, 2011. p. 14-31.

DEMING, J. A.; BERGERON, R.; LESLIE, K. E.; DEVRIES, T .J. Associations of housing, management, milking activity, and standing and lying behavior of dairy cows milked in automatic systems. **Journal of Dairy Science**, v. *96*, n. 1, p. 344-351, 2013.DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2012-5985.

DRACH, U.; HALACHMI, I.; PNINI, T.; IZHAKI, I.; DEGANI, A. Automatic herding reduces labour and increases milking frequency in robotic milking. **Biosystems Engineering**, v. *155*, p. 134-141, 2017.DOI: http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.12.010.

FERLAND, J.; VASSEUR, E.; DUPLESSIS, M.; PAJOR, E. A.; PELLERIN, D. Economic impact of introducing automatic milking system on Canadian dairy farms. **Journal of Animal Science**, v. *94*, n. 5, p. 600-601, 2016.DOI: http://doi.org/10.2527/jam2016-1246.

HANSEN, B. G. Robotic milking-farmer experiences and adoption rate in Jæren, Norway. **Journal of Rural Studies**, v. *41*, p. 109-117, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2015.08.004.

HOVINEN, M.; PYORALA, S. Invited review: udder health of dairy cows in automatic milking. **Journal of Dairy Science**, v. *94*, n. 2, p. 547-562, 2011. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2010-3556.

JACOBS, J. A.; SIEGFORD, J. M. *Invited review*: the impact of automatic milking systems on dairy cow management, behavior, health, and welfare. **Journal of Dairy Science**, v. *95*, n. 5, p. 2227-2247, 2012. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2011-4943.

KING, M. T. M.; PAJOR, E. A.; LEBLANC, S. J.; DEVRIES, T. J. Associations of herd-level housing, management, and lameness prevalence with productivity and cow behavior in herds with automated milking systems. **Journal of Dairy Science**, v. *99*, n. 11, p. 9069-9079, 2016. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2016-11329.

LYONS, N. A.; KERRISK, K. L. Current and potential system performance on commercial automatic milking farms. **Animal Production Science**, v. *57*, n. 7, p. 1550-1556, 2017. DOI: http://doi.org/10.1071/AN16513.

MACULAN, R.; LOPES, M. A. Ordenha robotizada de vacas leiteiras: uma revisão. **Boletim de Indústria Animal**, v. *73*, n. 1, p. 80-87, 2016. DOI: http://doi.org/10.17523/bia.v73n1p80.

PIWCZYŃSKI, D.; SITKOWSKA, B.; KOLENDA, M.; BRZOZOWSKI, M.; AERTS, J.; SCHORK, P. M. Forecasting the milk yield of cows on farms equipped with automatic milking system with the use of decision trees. **Animal**

Science Journal, v. *91*, n. 1, p. e13414, 2020. DOI: http://doi.org/10.1111/asj.13414.

RODENBURG, J. Robotic milkers: What, where... and how much. In: OHIO DAIRY MANAGEMENT CONFERENCE, 2002, Ontario. **Proceedings** [...]. Ontario: Ontario Ministry of Agriculture and Food, 2002. p. 1-18.

RODENBURG, J. Robotic milking: technology, farm design, and effects on work flow. **Journal of Dairy Science**, v. *100*, n. 9, p. 7729-7738, 2017. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2016-11715.

ROSSING, W.; HOGEWERF, P. H.; IPEMA, A. H.; KETELAAR-DE LAUWERE, C. C.; DE KONING, C. J. A. M. Robotic milking in dairy farming. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, v. *45*, n. 1, p. 15-31, 1997. DOI: http://doi.org/10.18174/njas.v45i1.523.

SALFER, J. A.; MINEGISHI, K.; LAZARUS, W.; BERNING, E.; ENDRES, M. I. Finances and returns for robotic dairies. **Journal of Dairy Science**, v. *100*, n. 9, p. 7739-7749, 2017. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2016-11976.

SHORTALL, J.; SHALLOO, L.; FOLEY, C.; SLEATOR, R. D.; O'BRIEN, B. Investment appraisal of automatic milking and conventional milking technologies in a pasture-based dairy system. **Journal of Dairy Science**, v. *99*, n. 9, p. 7700-7713, 2016. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2016-11256.

SILVI, R. R.; PAIVA, C. A. V.; TOMICH, T. R.; MACHADO, F. S.; MENDONCA, L. C.; CAMPOS, M. M.; PEREIRA, L. G. R. **Pecuária leiteira de precisão**: sistemas de ordenhas robotizadas. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2018. 30 p. (Embrapa Gado de Leite. Documentos, 230).

SILVI, R.; PEREIRA, L. G. R.; PAIVA, C. A. V.; TOMICH, T. R.; TEIXEIRA, V. A.; SACRAMENTO, J. P.; FERREIRA, R. E. P.; COELHO, S. G.; MACHADO, F. S.; CAMPOS, M. M.; DÓREA, J. R. R. Adoption of precision technologies by Brazilian dairy farms: the farmer's perception. **Animals (Basel)**, v. *11*, n. 3488, p. 3488, 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/ani11123488.

SITKOWSKA, B.; AERTS, J.; PIWCZYŃSKI, D.; WÓJCIK, P.; KOLENDA, M. Changes in milking intervals following automatic milking system installation in selected dairy cattle herds in Poland. **Folia Pomeranae Universitatis Technologiae Stetinensis. Agricultura, Alimentaria, Piscaria et Zootechnica**, v. *334*, n. 42, p. 153-162, 2017. DOI: http://doi.org/10.21005/AAPZ2017.42.2.14.

SVENNERSTEN-SJAUNJA, K. M.; PETTERSSON, G. Pros and cons of automatic milking in Europe. **Journal of Animal Science**, v. *86*, n. 13, p. 37-46, 2008. DOI: http://doi.org/10.2527/jas.2007-0527.

TREMBLAY, M.; HESS, J. P.; CHRISTENSON, B. M.; MCINTYRE, K. K.; SMINK, B.; VAN DER KAMP, A. J.; DE JONG, L. G.; DÖPFER, D. Customized recommendations for production management clusters of North American automatic milking systems. **Journal of Dairy Science**, v. *99*, n. 7, p. 5671-5680, 2016. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2015-10153.

TSE, C.; BARKEMA, H. W.; DEVRIES, T. J.; RUSHEN, J.; PAJOR, E.A. Effect of transitioning to automatic milking systems on producers' perceptions of farm management and cow health in the Canadian dairy industry. **Journal of Dairy Science**, v. *100*, n. 3, p. 2404-2414, 2017. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2016-11521.

TSE, C.; BARKEMA, H. W.; DEVRIES, T. J.; RUSHEN, J.; PAJOR, E.A. Impact of automatic milking systems on dairy cattle producers' reports of milking labour management, milk production and milk quality. **Animal**, v. *12*, n. 12, p. 2649-2656, 2018. DOI: http://doi.org/10.1017/S1751731118000654.

UNAL, H.; KURALOGLU, H.; KOYUNCU, M.; ALIBAS, K. Effect of cow traffic type on automatic milking system performance in dairy farms. **The Journal of Animal and Plant Sciences**, v. *27*, n. 5, p. 1454-1463, 2017.

79

Adoção de tecnologias de precisão em fazendas leiteiras no Brasil

Adoption of precision technologies on dairy farms in Brazil

Abias Santos Silva[1], Jaciara Diavão[2], Rebeca Ribeiro Silvi[3], Vanessa Amorim Teixeira[4], Thierry Ribeiro Tomich[5], Claudio Antônio Versiani Paiva[6], Mariana Magalhães Campos[7], Fernanda Samarini Machado[8], Rafael Ehrich Pontes Ferreira[9], João Ricardo Rebouças Dórea[10], Luiz Gustavo Ribeiro Pereira[11]

[1]Pós-doutorando, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, abias.severo@gmail.com
[2]Pós-doutorando, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, jacidiavao@gmail.com
[3]Doutora em Ciência Animal, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus (BA), Brasil, rebecasilvy@yahoo.com.br
[4]Doutora em Zootecnia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG), Brasil, vanessateixeiraamorim@gmail.com
[5]Pesquisador, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, thierry.tomich@embrapa.br
[6]Pesquisador, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, claudio.paiva@embrapa.br
[7]Pesquisador, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, mariana.campos@embrapa.br
[8]Pesquisador, Pesquisador, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, fernanda.samarini@embrapa.br
[9]Estudante de Doutorado, Animal and Dairy Sciences Department, University of Wisconsin, Madison, EUA, referreira@wisc.edu
[10]Professor Assistente, Animal and Dairy Sciences Department, University of Wisconsin, Madison, EUA, joao.dorea@wisc.edu
[11]Pesquisador, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, luiz.gustavo@embrapa.br

RESUMO

A otimização dos processos nas fazendas leiteiras vem ocorrendo devido à necessidade de equilibrar a carga de trabalho com margens de lucro cada vez mais estreitas. A adoção de tecnologias de precisão tem contribuído para o aumento da eficiência bioeconômica dos sistemas de produção. Nesse contexto, um levantamento sobre a adoção de tecnologias de precisão em fazendas leiteiras foi realizado para: i) caracterizar e identificar agrupamentos de fazendas leiteiras que adotam tecnologias de precisão, e ii) identificar as principais tecnologias utilizadas. Fazendas com maior produção de leite (10.001 e 30.000 L/dia) apresentam elevada adoção de tecnologias (n = 3,5), comparadas às fazendas de baixa produção (n = 0,41; < 500 L/dia). A "disponibilidade de assistência técnica" (4,55) é o critério mais importante apontado pelos produtores como fator para adoção das tecnologias, seguido por "custo-benefício" (4,48), "facilidade de uso" (4,39), "custo de investimento" (4,36) e "compatibilidade do *software* de gerenciamento" (4,20). A adoção de tecnologias de precisão pelas fazendas brasileiras ainda é considerada baixa, proporcionando aos fabricantes, pesquisadores e educadores uma oportunidade de explorar o setor. As tecnologias para monitorar automaticamente a produção de leite e a saúde do úbere foram as mais utilizadas pelos produtores. Os principais motivos para não investir em tecnologias de precisão estão relacionados às questões econômicas e ao desconhecimento do produtor sobre as tecnologias disponíveis ou a importância dos parâmetros monitorados.

Palavras-chave: dispositivos; pecuária de precisão; produção de leite; sensores.

ABSTRACT

The optimization of processes on dairy farms has been taking place due to the need to balance the workloads with increasingly narrow profit margins. The adoption of precision technologies has contributed to an increase in the bioeconomic efficiency of production systems. In this context, a survey on the adoption of precision technologies in dairy farms was carried out to *i*) characterize and identify clusters of dairy farms that adopt precision technologies and *ii*) identify the leading technologies used. Farms with higher milk production (10001 and 30000 L/d) show high technology adoption (n = 3.5), compared to low-production farms (n = 0.41; < 500 L/d) have low adoption of precision technologies (n = 0.41). Availability of technical assistance (4.55) is the essential criterion pointed out by producers as a factor for adopting technology, followed by "cost-effectiveness" (4.48), "ease of use" (4.39), "investment cost" (4.36), and "compatibility of management software" (4.20). The adoption of precision technologies by Brazilian farms is still considered low, providing manufacturers, researchers, and educators with an opportunity to explore the sector. Technologies to automatically monitor milk production

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000058

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

and udder health were the most used by producers. The main reasons for not investing in precision technologies are related to economic issues and the producer's lack of knowledge about the technologies available or the importance of the parameters monitored.

Keywords: devices; precision livestock farming; milk production; sensors.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a otimização dos processos é uma tendência mundial dentro de uma fazenda leiteira, devido à necessidade dos produtores em equilibrar altas cargas de trabalho com margens de lucro cada vez mais estreitas. Consumidores mais exigentes, mudanças climáticas, aumento da população e qualidade e segurança dos alimentos estão mudando os processos e a tomada de decisão pelos produtores de leite. Além disso, a eficiência desses processos será fundamental para aumentar a lucratividade da pecuária leiteira de forma sustentável (Bewley, 2010; Britt et al., 2018).

O monitoramento do rebanho é um dos mais complexos desafios das fazendas leiteiras, especialmente em fazendas de larga escala de produção (Borchers; Bewley, 2015). Ao levar em conta a complexidade das atividades realizadas nas fazendas leiteiras, o monitoramento automático pode direcionar as tomadas de decisão, melhorando as práticas de manejo, as quais geralmente se baseiam apenas na experiência e no julgamento do produtor (Frost et al., 2003).

Diversas opções de tecnologias e dispositivos de precisão estão atualmente disponíveis; contudo, alguns produtores simplesmente não as conhecem. Como exemplo, sensores e dispositivos podem ser usados para mensuração de produção de leite, ruminação, atividade, temperatura, peso corporal, escore de condição corporal (ECC) e outros eventos relacionados com a saúde e o bem-estar animal (Nebel, 2013).

Diversos estudos têm investigado o uso de tecnologias de precisão na pecuária leiteira (Borchers; Bewley, 2015; Gargiulo et al., 2018). No entanto, poucos estudos fornecem informações sobre quais sistemas são amplamente utilizados pelas fazendas leiteiras e quais são raramente utilizados. O crescente interesse por tecnologias para reduzir a mão de obra, maximizar a produtividade e aumentar a lucratividade de forma sustentável está se tornando perceptível em diversos países, incluindo o Brasil. Informações sobre a adoção de tecnologias, percepção e eficácia em fazendas leiteiras podem lançar luz sobre os desafios que precisam ser abordados pela pesquisa científica e programas de transferência de tecnologias. Nesse contexto, foi realizado o levantamento sobre a adoção de tecnologias de precisão em fazendas leiteiras com os objetivos de: i) caracterizar e agrupar fazendas leiteiras brasileiras que adotam tecnologias de precisão, e ii) identificar as principais tecnologias utilizadas pelos produtores brasileiros.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Uma pesquisa com 22 perguntas foi desenvolvida e distribuída via web, usando o Google Forms (Google Inc., Mountain View, CA, EUA), de julho de 2018 a julho de 2020. As informações de contato dos produtores foram obtidas nas bases de dados da Associação Brasileira de Produtores de Leite (Abraleite), da Associação Holandesa de Minas Gerais, da Associação Brasileira do Girolando, do Centro de Inteligência do Leite (CILeite/Embrapa) e do MilkPoint. Para evitar erros de amostragem, o questionário da pesquisa foi distribuído por todas as regiões geográficas brasileiras e a não adoção de ordenha mecanizada foi o critério de exclusão das fazendas respondentes.

Os produtores forneceram: número de colaboradores empregados na fazenda; sistema de produção (confinamento, semiconfinamento ou a pasto); participação do produtor e familiares na fazenda; tamanho atual do rebanho; produção diária de leite, e raça mais utilizada. Esses itens foram apresentados aos entrevistados em categorias.

As tecnologias da lista pré-determinada foram selecionadas com base no estudo de Bewley (2010) e nas tecnologias disponíveis no mercado brasileiro. Uma escala contendo valores numéricos (1 a 5) foi utilizada para as respostas sobre a importância de fatores predeterminantes na decisão de compra de tecnologias de pecuária leiteira de precisão. Os respondentes também usaram uma escala (1 a 5) para classificar as tecnologias da pecuária leiteira, com base na utilidade, da mesma lista usada na questão de adoção de tecnologia.

Um total de 448 produtores completaram a pesquisa. Para a amostragem e análise de dados, 70 fazendas foram excluídas devido a erros ou respostas incompletas. O conjunto de dados final foi composto por 378 propriedades leiteiras distribuídas em 17 estados brasileiros. Realizou-se uma análise de agru-

pamento para reunir fazendas com características semelhantes.

O primeiro agrupamento (1) incluiu as fazendas de alta produção e caracterizou-se por uma média de 31 funcionários, um número a partir de 1.001 vacas leiteiras no rebanho mantido em sistema confinado e produção de leite entre 10.001 e 30.000 L/dia. O segundo agrupamento (2) incluiu fazendas com média de 15 funcionários, 501 a 1.000 vacas leiteiras e produção de leite entre 5.001 e 10.000 L/dia. O terceiro agrupamento (3) incluiu fazendas com média de seis funcionários, 201 a 300 vacas leiteiras e produção de leite entre 2.001 e 5.000 L/dia. As principais características do quarto agrupamento (4) foram uma média de cinco funcionários por fazenda, 101 a 200 vacas leiteiras e produção de leite entre 1.001 e 2.000 L/dia. O quinto agrupamento (5) caracterizou-se por uma média de três funcionários por fazenda, 51 a 100 vacas leiteiras e produção de leite entre 501 e 1.000 L/dia. O sexto agrupamento (6) apresentou média de três funcionários por fazenda, 101 a 200 vacas leiteiras e produção de leite entre 501 e 1.000 L/dia. O sétimo agrupamento (7) caracterizou-se por uma média de três funcionários por fazenda, 51 a 100 vacas leiteiras e produção de leite abaixo de 500 L/dia. Utilizou-se como variáveis discriminatórias a idade do agricultor, o número de funcionários, o sistema de produção, o tamanho do rebanho, a produção de leite e o número de tecnologias adotadas. A análise dos dados foi realizada em Python 3.6 utilizando o módulo Scikit-Learn (Tabela 1).

Para serem usadas no algoritmo de agrupamento, todas as variáveis discriminatórias receberam valores numéricos, pois algumas delas eram categóricas. A conversão para valores numéricos foi feita da seguinte forma: "idade do agricultor" foi convertida para valores inteiros entre 0 e 4, sendo 0 (menor ou igual a 30 anos) e 4 (maior ou igual a 60 anos); para "sistema de produção", foram atribuídos valores inteiros entre 0 e 2, sendo 0 (a pasto), 1 (semiconfinado) e 2 (confinado); para "tamanho do rebanho", foi atribuído um valor médio para cada faixa: entre 201 e 300 animais, foi atribuído o valor 250, e as faixas extremas "menor ou igual a 50 animais" e "maior ou igual a 1.001 animais", foram atribuídos os valores 25 e 1.250, respectivamente; para "produção de leite", foi atribuído o valor médio para cada faixa: entre 1.001 e 2.000 litros por dia", foi atribuído o valor 1.500, e as faixas extremas "menor ou igual a 500 litros por dia" e " maior ou igual a 30.001 litros por dia" foram atribuídos valores 250 e 40.000, respectivamente. Foram atribuídos pesos para cada variável discriminatória, a saber: "idade da fazenda", "número de colaboradores", "sistema de produção" e "tamanho do rebanho" (peso 1); "produção de leite" (peso 2) e "número de tecnologias adotadas" (peso 3).

Tabela 1. Agrupamentos e distribuição das fazendas em cada agrupamento.

Agrupamentos*	Número de fazendas
1	13
2	27
3	12
4	50
5	112
6	108
7	56

*1: alta produção, alta tecnologia; 2: média-alta produção, média tecnologia; 3: média produção, alta tecnologia; 4: média produção, média tecnologia; 5: média-baixa produção, baixa tecnologia, jovens; 6: média-baixa produção, baixa tecnologia, mais velhos; 7: a pasto, baixa tecnologia.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As fazendas que participaram do levantamento apresentaram, em média, 5,66 empregados, 561 L/dia/empregado, produção de leite de 3.780 L/dia e 1,33 tecnologia por fazenda.

Houve maior adoção de tecnologias nas fazendas com maior produção de leite (Tabela 2). As fazendas do agrupamento 1 apresentaram adoção de 3,5 tecnologias/fazenda. As fazendas do segundo agrupamento tinham 1,07 tecnologia/fazenda. As fazendas do terceiro agrupamento apresentaram a maior adoção de tecnologias (6,67 tecnologias/fazenda), enquanto o agrupamento 4 apesentou média adoção (2,74 tecnologias/fazenda). As fazendas dos agrupamentos 6, 7 e 8 caracterizaram-se por baixa adoção de tecnologias de precisão (0,4; 0,36, e 0,41, respectivamente).

O nível de produção de leite, a adoção de tecnologia e o tamanho do rebanho (L/dia) diminuíram do agrupamento 1 para o agrupamento 7. O agrupamento 1 reuniu fazendas com alto nível de adoção de tecnologia (equipamentos e infraestrutura), rebanhos com maior número de vacas e a maior produção de leite. Por outro lado, o agrupamento 7 reuniu fazendas com baixo nível de adoção de tecnologia e pequenos rebanhos de animais mestiços, criados em sistemas de pastejo, com baixa produção de leite. Stone (2020) usou os critérios propostos por Rogers (1995) para categorizar os adotantes de tecnologia, como: (1) inovadores, (2) adotantes iniciais, (3) maioria inicial, (4) maioria tardia e (5) retardatários. Os inovadores

Tabela 2. Tecnologias usadas nas fazendas leiteiras no Brasil.

	Agrupamentos* (*n* e porcentagem)														Total	
	1		2		3		4		5		6		7			
Tecnologia	***n*13**	**%**	***n*27**	**%**	***n*12**	**%**	***n* 50**	**%**	***n* 112**	**%**	***n*108**	**%**	***n*56**	**%**	***n*378**	**%**
Sensor de medição de leite	10	77	14	52	10	83	36	72	28	25	19	18	3	5	120	32
Sala de ordenha com portão inteligente	6	46	3	11	8	67	15	30	7	6	9	8	7	13	55	15
Sensor para detecção de mastite	5	38	1	4	12	100	12	24	0	0	2	2	0	0	32	8
Pedômetro	4	31	1	4	10	83	11	22	0	0	0	0	1	2	27	7
Sensor de temperatura corporal	0	0	2	7	4	33	12	24	4	4	2	2	2	4	26	7
Sistema automatizado de alimentação	1	8	0	0	4	33	13	26	3	3	3	3	0	0	24	6
Sensor de ruminação	3	23	1	4	6	50	10	20	0	0	1	1	0	0	21	6
Plataforma automática de pesagem	2	15	3	11	1	8	7	14	3	3	2	2	2	4	20	5
Alimentador para bezerros	3	23	1	4	6	50	5	10	0	0	1	1	0	0	16	4
NIRs[¥]	2	15	1	4	3	25	5	10	0	0	0	0	0	0	11	3
Cochos e bebedouros automáticos	0	0	0	0	5	42	4	8	0	0	0	0	0	0	9	2
Analisador de composição do leite	1	8	0	0	4	33	1	2	0	0	0	0	0	0	6	2
Sensor de ECC	1	8	0	0	2	17	1	2	0	0	0	0	0	0	4	1
Sensor de ofegação	0	0	1	4	2	17	1	2	0	0	0	0	0	0	4	1
Sensor de pH ruminal	0	0	0	0	1	8	0	0	1	1	1	1	1	2	4	1
GPS ou sistema de posicionamento	0	0	0	0	1	8	1	2	0	0	0	0	1	2	3	1
Sensor de problemas de casco	1	8	1	4	1	8	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1
Sensor de fertilidade acoplado à ordenha	1	8	0	0	1	8	1	2	0	0	0	0	0	0	3	1
Câmera termográfica	1	8	0	0	0	0	2	4	0	0	0	0	0	0	3	1

*1: alta produção, alta tecnologia; 2: média-alta produção, média tecnologia; 3: média produção, alta tecnologia; 4: média produção, média tecnologia; 5: média-baixa produção, baixa tecnologia, jovens; 6: média-baixa produção, baixa tecnologia, mais velhos; 7: a pasto, baixa tecnologia; [¥]NIRs: espectrofotômetro no infravermelho próximo.

assumem riscos e os retardatários são extremamente aversos ao risco.

Os produtores dos agrupamentos 4 ao 7 provavelmente são mais aversos ao risco do que aqueles dos agrupamentos 1 ao 3. Fazendas de alta produção, caracterizadas por proprietários mais jovens, adotam novas tecnologias simplesmente porque ela é nova (Rogers, 1995), o que é uma característica provavelmente mais evidente no agrupamento 3. Eles tendem a se preocupar em manter uma reputação de estar à frente da curva (Tibshirani; Walther; Hastie, 2001). As fazendas concentradas nos agrupamentos 1 e 2, provavelmente, tomam decisões de adoção de tecnologias com base na utilidade e no benefício prático, em oposição à reputação ou ao fator de novidade. Por outro lado, os retardatários (agrupamentos 4, 5 e 6) são mais lentos para adotar novas tecnologias e só o fazem quando são forçados por alguma força externa.

A adoção de tecnologias de precisão depende de alguns fatores que influenciam a decisão de aquisição da tecnologia (Tabela 3). Os produtores foram solicitados a dar uma nota de 1 a 5 para cada critério pré-estabelecido, e a "disponibilidade de assistência técnica" (4,55) foi o critério mais importante, seguido por "relação custo-benefício" (4,48), "facilidade de uso" (4,39), "custo de investimento" (4,36) e "compatibilidade do *software* de gerenciamento" (4,2). Com base no agrupamento, os produtores dos agrupamentos 1 (4,77), 2 (4,70) e 7 (4,39) consideraram a "relação custo-benefício" como principal critério para decisão de compra; a "disponibilidade de assistência técnica" foi o critério mais importante para os produtores dos agrupamentos 6 (4,57 ± 0,81), 5 (4,63 ± 0,54) e 3 (4,92 ± 0,08), e a "facilidade de uso" foi o critério mais importante para os produtores dos agrupamentos 7 (4,39) e 4 (4,43) (Tabela 3).

Tabela 3. Principais fatores para aquisição e uso de tecnologias de precisão em fazendas leiteiras no Brasil.

Agrupamentos[¥]	Fazendas	Disponibilidade de assistência técnica		Relação custo benefício		Facilidade de uso		Custo do investimento		Compatibilidade com software de gestão	
	n	Média[†]	σ²	Média[†]	σ²	Média[†]	σ²	Média[†]	σ²	Média[†]	σ²
1	13	4,54	0,40	4,77	0,33	4,38	0,54	4,23	0,79	4,69	0,37
2	27	4,67	0,67	4,70	0,65	4,44	0,84	4,48	0,69	4,52	0,84
3	12	4,92	0,08	4,42	0,41	4,58	0,24	4,58	0,41	4,50	0,75
4	50	4,40	1,28	4,40	1,04	4,43	1,02	4,31	1,03	4,20	1,24
5	112	4,63	0,54	4,48	0,75	4,34	0,94	4,41	0,75	4,24	0,93
6	108	4,57	0,81	4,48	0,82	4,40	0,80	4,32	0,77	4,30	0,98
7	56	4,35	1,08	4,39	0,87	4,39	1,02	4,30	0,93	4,07	1,25
Total	378	4,55	0,80	4,48	0,80	4,39	0,88	4,36	0,81	4,27	1,02

[¥]1: alta produção, alta tecnologia; 2: média-alta produção, média tecnologia; 3: média produção, alta tecnologia; 4: média produção, média tecnologia; 5: média-baixa produção, baixa tecnologia, jovens; 6: média-baixa produção, baixa tecnologia, mais velhos; 7: a pasto, baixa tecnologia. [†]Valores calculados atribuindo os seguintes valores às categorias de resposta: 1: não importante; 2: de pouca importância; 3: importância moderada; 4: importante; 5: muito importante.

Os resultados observados nas fazendas leiteiras no Brasil sobre os critérios considerados para a aquisição de tecnologias de precisão estão de acordo com o reportado por Borchers e Bewley (2015) em fazendas leiteiras americanas. Os proprietários apontaram a relação custo-benefício, o custo total do investimento, a facilidade de uso e a disponibilidade de assistência técnica como fatores determinantes para a adoção das tecnologias. Todos os fatores mencionados podem ser considerados importantes para avaliar a decisão de adotar tecnologias de precisão, pois todos tiveram pontuação acima de 4, quando o valor máximo selecionável foi 5. Os agrupamentos 5, 6 e 7 (baixa adoção de tecnologia) atribuíram pontuações mais baixas em comparação aos agrupamentos 1, 2 e 3, que possuem maior nível de adoção de tecnologia, mostrando que aqueles apresentam maior resistência à adoção de tecnologias de precisão.

4 CONCLUSÕES

A adoção de tecnologias de precisão pelas fazendas brasileiras ainda é considerada baixa, proporcionando aos fabricantes, pesquisadores e educadores uma oportunidade de explorar o setor. As tecnologias para monitorar a produção automática do leite e a saúde do úbere foram as mais utilizadas. Os principais motivos para não investir em tecnologias de precisão estão relacionados às questões econômicas e ao desconhecimento do produtor sobre as tecnologias disponíveis ou a importância dos parâmetros monitorados por elas.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa; a Guilherme Fernando Mattos, Castrolanda, Paraná; a Renê Granato, COTRIJAL, Rio Grande do Sul; a Christiano Nascif, Labor Rural, Minas Gerais; a Marcelo Pereira de Carvalho, Milkpoint, São Paulo; à Associação Brasileira dos Criadores de Girolando, e à Associação dos Criadores de Gado Holandês de Minas Gerais, Minas Gerais, pelo apoio na aplicação da pesquisa. Um agradecimento especial aos 448 produtores de leite brasileiros que dedicaram tempo para responder à pesquisa.

REFERÊNCIAS

BEWLEY, J. Precision dairy farming: Advanced analysis solutions for future profitability. In: THE FIRST NORTH AMERICAN CONFERENCE ON PRECISION DAIRY MANAGEMENT, 2010, Kentucky. **Proceedings [...]**. Kentucky: University of Kentucky, 2010. p. 1-17.

BORCHERS, M. R.; BEWLEY, J. An assessment of producer precision dairy farming technology use, prepurchase considerations, and usefulness. **Journal of Dairy Science**, v. 98, n. 6, p. 4198-4205, 2015. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2014-8963.

BRITT, J. H.; CUSHMAN, R. A.; DECHOW, C. D.; DOBSON, H.; HUMBLOT, P.; HUTJENS, M. F.; JONES, G. A.; RUEGG, P. S.; SHELDON.; STEVENSON, J. S. Invited review: Learning from the future – A vision for dairy farms and cows in 2067. **Journal of Dairy Science**, v. 101, n. 5, p. 3722-3741, 2018. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2017-14025.

FROST, A. R.; PARSONS, D. J.; STACEY, K. F.; ROBERTSON, A. P.; WELCH, S. K.; FILMER, D.; FOTHERGILL, A. Progress

towards the development of an integrated management system for broiler chicken production. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 39, n. 3, p. 227-240, 2003. DOI: http://doi.org/10.1016/S0168-1699(03)00082-6.

GARGIULO, J. I.; EASTWOOD, C. R.; GARCIA, S. C.; LYONS, N. A. Dairy farmers with larger herd sizes adopt more precision dairy technologies. **Journal of Dairy Science**, v. 101, n. 6, p. 5466-5473, 2018. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2017-13324.

NEBEL, R. L. Attaining reproductive solutions through activity and health monitoring. In: PROCEEDINGS OF THE PRECISION DAIRY CONFERENCE AND EXPO, 2013, Rochester. **Proceedings [...]**. Rochester: Society for Theriogenology, 2013. p. 75-80.

ROGERS, E. M. **Diffusion of innovations**. 4. ed. Nova York: Free Press, 1995. 527 p.

STONE, A. E. Symposium review: The most important factors affecting adoption of precision dairy monitoring technologies. **Journal of Dairy Science**, v. 103, n. 6, p. 5740-5745, 2020. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2019-17148.

TIBSHIRANI, R.; WALTHER, G.; HASTIE, T. Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B, Statistical Methodology**, v. 63, n. 2, p. 411-423, 2001. DOI: http://doi.org/10.1111/1467-9868.00293.

80

Adoção de tecnologias de pecuária de precisão – percepção dos produtores de leite no Brasil

The perception of Brazilian dairy farmers for the adoption of precision livestock technologies

Jaciara Diavão [1], Abias Santos Silva [2], Rebeca Ribeiro Silvi[3], Vanessa Amorim Teixeira[4], Thierry Ribeiro Tomich[5], Claudio Antônio Versiani Paiva[6], Mariana Magalhães Campos[7], Fernanda Samarini Machado[8], Rafael Ehrich Pontes Ferreira[9], João Ricardo Rebouças Dórea[10], Luiz Gustavo Ribeiro Pereira[11]

[1] *Pós-doutorando, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, jacidiavao@gmail.com*
[2] *Pós-doutorando, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, abias.severo@gmail.com*
[3] *Doutora em Ciência Animal, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus (BA), Brasil, rebecasilvy@yahoo.com.br*
[4] *Doutora em Zootecnia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG), Brasil, vanessateixeiraamorim@gmail.com*
[5] *Pesquisador, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, thierry.tomich@embrapa.br*
[6] *Pesquisador, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, claudio.paiva@embrapa.br*
[7] *Pesquisador, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, mariana.campos@embrapa.br*
[8] *Pesquisador, Pesquisador, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, fernanda.samarini@embrapa.br*
[9] *Estudante de Doutorado, Animal and Dairy Sciences Department, University of Wisconsin, Madison (WI), EUA, referreira@wisc.edu*
[10] *Professor Assistente, Animal and Dairy Sciences Department, University of Wisconsin, Madison (WI), EUA, joao.dorea@wisc.edu*
[11] *Pesquisador, Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora (MG), Brasil, luiz.gustavo@embrapa.br*

RESUMO

A adoção de tecnologias de precisão nas fazendas leiteiras pode auxiliar o gerenciamento com base em dados, melhorando o desempenho econômico, social e ambiental do sistema de produção. Compreender a percepção dos produtores quanto às tecnologias de precisão pode contribuir com o desenvolvimento de estratégias que visem aumentar a utilização e a compreensão dos motivos da não adoção das tecnologias. Assim, foi realizado um levantamento visando entender a percepção dos produtores quanto à utilidade de cada tecnologia e identificar os motivos de não adoção. As tecnologias mais úteis apontadas pelos produtores foram os sistemas automáticos de avaliação da produção de leite; sensores para detecção de mastite; sistemas de alimentação automatizado; pedômetro, e sensores de composição do leite. Os produtores indicaram GPS/dispositivo de localização/posição do animal, escore automático de condição corporal (ECC) e termografia infravermelha como os menos úteis. Os produtores também indicaram os portões inteligentes na sala de ordenha, sensor de temperatura corporal, sensor de ruminação e alimentadores para bezerros como tecnologias úteis. As três razões mais importantes para não investir em tecnologia de precisão foram "preferem investir em outras áreas"; "incerteza sobre a rentabilidade do investimento", e "baixa integração com outros sistemas e *softwares*". Os principais problemas enfrentados pelos produtores e que podem ser minimizados com o auxílio de tecnologias de precisão foram: mastite, tristeza parasitária bovina, mão de obra, problemas com carrapatos, problemas no período de transição, alto custo de insumos e gestão de dejetos.

Palavras-chave: agricultura de precisão; fazendas inteligentes; pecuária.

ABSTRACT

The adoption of precision technologies on dairy farms can help with data-based management, improving the economic, social, and environmental performance of the production system. Understanding the producers' perception regarding precision technologies can help the development of strategies aimed at increasing utilization and understanding the reasons for not adopting technologies. Thus, a survey was carried out to understand the farmers' perception of the usefulness of each technology and to identify the reasons for not adopting it. The most useful technologies pointed out by producers were automatic systems for evaluating milk production; sensors

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000059

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

for detecting mastitis, automated feeding systems; pedometers, and milk composition sensors. Farmers indicated GPS/animal position/location device, automatic body condition scoring (BCS) and infrared thermography as the least useful. Smart gates in the milking parlor, body temperature sensor, rumination sensor and calf feeders were also indicated as useful technologies. The three most important reasons for not investing in precision technology were "preferring to invest in other areas"; "uncertainty about the profitability of the investment"; and "poor integration with other systems and software". The main problems faced by the farmers and that which could be minimized with the help of precision technologies were: mastitis, bovine parasitic disease, labor, problems with ticks, problems during the transition period, high cost of inputs and waste management.

Keywords: livestock farming, precision agriculture, smart farms

1 INTRODUÇÃO

A adoção de tecnologias aumenta a capacidade de gestão da variabilidade animal, temporal e espacial, permitindo a intensificação da produção e aumentando a produtividade (Tzounis et al., 2017). O novo modelo de fazendas inteligentes necessita de soluções tecnológicas para a coleta, o armazenamento e a transmissão de dados em tempo real, que abrangem desde o desenvolvimento de sensores automáticos para coleta de informações dos animais até sistemas de inteligência artificial para integração e customização de informações de acordo com as necessidades de cada produtor (Bowen et al., 2021; Sordi; Vaz, 2021).

Muitas opções de tecnologias de precisão estão disponíveis no mercado (Rutten et al., 2013), com destaque para os dispositivos e sensores que permitem medir produção, composição e a qualidade do leite (Joshi et al., 2017), posição e atividade animal (Meunier et al., 2018), ruminação (Hamilton et al., 2019), e sistemas de visão computacional para avaliação automatizada de escore de condição corporal (ECC) (Bercovich et al., 2013; Spoliansky et al., 2016).

Ainda existem desafios a serem superados para que essas tecnologias sejam implementadas e disseminadas (Sordi; Vaz, 2021). Há poucos estudos fornecendo informações sobre quais tecnologias de pecuária de precisão estão sendo utilizadas nas fazendas leiteiras e qual a percepção do produtor sobre a utilidade das opções disponíveis no mercado.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar e fazer um estudo de agrupamento de fazendas leiteiras brasileiras que adotam em maior ou menor grau tecnologias de precisão, além de investigar a motivação por trás do investimento nessas tecnologias pelos produtores rurais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foi realizado um levantamento em 378 propriedades leiteiras, distribuídas em 17 estados brasileiros. A coleta de dados foi realizada por meio de 22 perguntas que foram enviadas por correio eletrônico, utilizando o Google Forms (Google Inc., Mountain View, CA). As informações de contato dos produtores foram obtidas nas bases de dados da Associação Brasileira de Produtores de Leite (Abraleite), Associação Holandesa de Minas Gerais, Associação Brasileira do Girolando, Centro de Inteligência do Leite (CILeite/Embrapa) e MilkPoint.

A pesquisa foi composta por questões que buscavam traçar o perfil das propriedades leiteiras com questões de ordem produtiva (sistema de produção: pastejo, semiconfinamento ou confinamento; tamanho do rebanho, e produção diária de leite); uso de tecnologias de precisão (uso de *software* de gerenciamento de rebanho, tipo de sistema de ordenha, tecnologias de precisão utilizadas na fazenda, fatores que determinam a decisão de compra de tecnologias de precisão, motivos para não investir em tecnologias de precisão e problemas que gostariam de resolver com o uso de tecnologias de precisão), e perfil dos trabalhadores que atuam na atividade leiteira (localização da propriedade, número de funcionários, idade do entrevistado, participação do produtor e familiares na fazenda).

Foi realizada uma análise de agrupamento das fazendas e as variáveis discriminatórias foram: idade do agricultor, número de funcionários, sistema de produção, tamanho do rebanho, produção de leite e número de tecnologias adotadas. As variáveis de entrada que eram categóricas e de valores (sistema de produção, idade do produtor e tamanho do rebanho) foram agrupadas em intervalos numéricos para geração dos agrupamentos.

Foi estabelecido que certas variáveis tivessem maior impacto nos agrupamentos, pois seriam mais relevantes para a pesquisa; então, foram multiplicados todos os valores de cada variável por um peso correspondente a essa variável, a saber: "idade do agricultor", "número de funcionários", "sistema de produção" e "tamanho do rebanho" (peso 1); "produção de leite" (peso 2), e "número de tecnologias adotadas" (peso 3).

Em seguida, foi implementado o algoritmo de agrupamento K-means (Arthur; Vassilvitskii, 2007) e escolhido o número de agrupamentos com base na estatística de gap proposta por Tibshirani et al. (2001). Assim, foram gerados sete agrupamentos e as características das propriedades de cada agrupamento são apresentadas na Tabela 1.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O nível de produção de leite, adoção de tecnologia e tamanho do rebanho diminuiu dos agrupamentos 1 para 7. O agrupamento 1 reuniu fazendas com alto nível de adoção de tecnologia (equipamentos e infraestrutura), rebanhos com maior número de vacas e a maior produção de leite. Por outro lado, o agrupamento 7 caracterizou-se por fazendas com baixo nível de adoção de tecnologia e pequenos rebanhos mestiços criados em sistemas de pastejo com baixa produção de leite.

As três principais razões para o não investimento em tecnologias de precisão foram: "preferem investir em outras áreas" (agrupamentos 2, 3, 4, 5, 6 e 7); "incerteza sobre a rentabilidade do investimento" (agrupamentos 2, 3, 4, 5, 6 e 7), e "baixa integração com outros sistemas e *softwares*" (agrupamentos 1, 3, 4, 6 e 7). Outros motivos, como: "existem alternativas para melhorar a gestão" (agrupamento 1), "não há assistência técnica na região" (agrupamento 5) e "existe muita informação/saber o que fazer com isso" (agrupamento 2), também foram considerados importantes para a tomada de decisão (Tabela 2).

Os principais problemas enfrentados pelos produtores foram "mastite", "tristeza parasitária bovina" (agrupamentos 4, 5, 6 e 7) e "mão de obra" (agrupamentos 2, 5, 6 e 7). Além disso, "problemas com carrapatos" (agrupamentos 4 e 5), "problemas no período de transição" (agrupamentos 2 e 3), "alto custo de insumos" (agrupamento 1) e "gestão de dejetos" (agrupamento 1) também foram considerados importantes (Tabela 3).

As tecnologias mais úteis apontadas pelos produtores foram os sistemas automáticos de fluxo de leite (média; variância) (4,05; 1,66); sensores para detecção de mastite (4,00; 1,57); sistemas de alimentação automatizado (3,50; 2,05); pedômetro (3,45; 1,95), e sensores de composição do leite (3,45; 1,95). Os produtores indicaram GPS/dispositivo de localização/posição do animal (2,85; 2,07), escore automático de condição corporal (ECC) (2,91; 2,00) e termografia infravermelha (2,97; 2,04) como os menos úteis. Portão inteligente na sala de ordenha (3,40; 1,84), sensor de temperatura corporal (3,24; 1,94), sensor de ruminação (3,13; 2,05) e alimentadores para bezerros (3,22; 1,87) também foram apontados como tecnologias úteis.

Foram observadas diferenças na percepção da utilidade das tecnologias entre agrupamentos. Em geral, os produtores do agrupamento 7, com baixos níveis de adoção de tecnologia, avaliaram as tecnologias como menos úteis em comparação aos valores reportados pelos produtores dos agrupamentos caracterizados como mais tecnificados (agrupamentos 1, 2 e 3). Normalmente, as tecnologias consideradas mais úteis pelos produtores também são aquelas com as quais eles estão mais familiarizados. Além disso, algumas tecnologias exigem mão de obra qualificada e mudanças nas atividades de manejo da fazenda, o que pode levar os proprietários a avaliarem negativamente as tecnologias (Borchers; Bewley, 2015).

Tabela 1. Características médias das fazendas com base nas variáveis usadas no agrupamento.

Agrupamento*	Fazendas	Idade do produtor	Número de funcionários	Sistema de produção	Total de animais	Leite	Tecnologias
	n	anos	n	sistema¶	n	Produção (L)	n
1	13	41 a 50	31	C	≥ 1.001	10.001 a 30.000	3,15
2	27	41 a 50	15	C	501 a 1.000	5.001 a 10.000	1,07
3	12	31 a 40	6	C	201 a 300	2.001 a 5.000	6,67
4	50	31 a 40	5	SC	101 a 200	1.001 a 2.000	2,74
5	112	31 a 40	3	SC	51 a 100	501 a 1.000	0,40
6	108	51 a 60	3	SC	101 a 200	501 a 1.000	0,36
7	56	41 a 50	3	P	51 a 100	≤ 500	0,29

*1: fazendas de alta produção; 2: produção média e alta tecnologia; 3: produção média-alta, tecnologia média; 4: produção média e tecnologia média; 5: jovem, produção média-baixo e tecnologia baixa; 6: idoso, média-baixa produção e baixa tecnologia; e 7: pastejo com baixa tecnologia; ¶C: confinamento; SC: semiconfinamento; P: pastejo.

Tabela 2. Três principais razões para não investir em tecnologias de precisão.

Agrupamento*	Fazendas	Razões					
	n	Primeiro	n	Segundo	n	Terceiro	*n*
1	10	incerteza sobre a rentabilidade do investimento	3	Existem alternativas para melhorar a gestão	3	baixa integração com outros sistemas e *softwares*	3
2	12	prefere investir em outras áreas	6	incerteza sobre a rentabilidade do investimento	4	há muita informação/ saber o que fazer com ela	2
3	27	prefere investir em outras áreas	13	incerteza sobre a rentabilidade do investimento	8	baixa integração com outros sistemas e *softwares*	3
4	49	prefere investir em outras áreas	18	incerteza sobre a rentabilidade do investimento	17	baixa integração com outros sistemas e *softwares*	11
5	112	prefere investir em outras áreas	43	incerteza sobre a rentabilidade do investimento	25	não há suporte técnico na região	16
6	105	prefere investir em outras áreas	29	incerteza sobre a rentabilidade do investimento	21	baixa integração com outros sistemas e *softwares*	14
7	53	prefere investir em outras áreas	22	incerteza sobre a rentabilidade do investimento	14	baixa integração com outros sistemas e *softwares*	10

*1 fazendas de alta produção; 2: produção média e alta tecnologia; 3: produção média-alta, tecnologia média; 4: produção média e tecnologia média; 5: jovem, produção média-baixo e tecnologia baixa; 6: idoso, média-baixa produção e baixa tecnologia; e 7: pastejo com baixa tecnologia.

Tabela 3. Os três principais problemas enfrentados pelos agricultores.

Agrupamento*	Fazendas	Problemas					
	n	Primeiro	n	Segundo	n	Terceiro	n
1	13	mastite/tristeza parasitária bovina	3	alto custo de insumos	3	gestão de dejetos	3
2	12	mastite	4	problemas no período de transição	2	mão de obra	2
3	27	mastite	8	mastite	5	problemas no período de transição	4
4	50	mastite	25	tristeza parasitária bovina	13	carrapato	9
5	112	mastite	45	tristeza parasitária bovina	15	mão de obra/carrapato	13
6	108	mastite	42	tristeza parasitária bovina	18	mão de obra	21
7	56	mastite	21	tristeza parasitária bovina	10	mão de obra	8

*1: fazendas de alta produção; 2: produção média e alta tecnologia; 3: produção média-alta, tecnologia média; 4: produção média e tecnologia média; 5: jovem, produção média-baixo e tecnologia baixa; 6: idoso, média-baixa produção e baixa tecnologia; e 7: pastejo com baixa tecnologia.

Contrastando com os resultados do presente levantamento realizado no Brasil, Sordi e Vaz (2021) destacaram que os principais desafios à adoção de tecnologias de precisão nas fazendas são: a) infraestrutura digital: conexão à internet, capacidade de processamento, armazenamento e transmissão de dados; b) qualificação: consultoria e extensão rural; c) insegurança e desconfiança: ceticismo e resistência às mudanças, incerteza quanto aos riscos e benefícios; d) integração e customização: integração pontual entre

tecnologias, e e) capital e crédito: custos de execução e manutenção; preços proibitivos e fragilidades econômicas dos pequenos produtores.

As razões mais importantes para não investir em tecnologia de precisão corroboram com os resultados observados por Steeneveld e Hogeveen (2015), na Holanda, em que os motivos principais foram "prefiro investir dinheiro em outras coisas para a fazenda", "incerteza quanto ao retorno do investimento" e "falta de integração com outros sistemas e *softwares* agrícolas".

Em relação à mastite, a adoção de sensores que medem a condutividade elétrica (CE) e a contagem de células somáticas do leite pode auxiliar na identificação e direcionar os protocolos de manejo (Silva et al., 2021). A tristeza parasitária bovina, o segundo problema mais importante, e os problemas com mão de obra (terceiro mais importante) também podem ser resolvidos ou mitigados por meio da adoção de tecnologias de precisão, as quais permitem a identificação na alteração do comportamento animal (atividade e ruminação) (Teixeira et al., 2022), e ainda pela adoção de equipamentos que permitem a automação de processos, como ordenhas robotizadas e sistemas automáticos de alimentação (Souza et al., 2021). Mais informações sobre o estudo podem ser consultadas em Silvi et al. (2021) e no link: https://tinyurl.com/2epvdcuz, no qual é possível acessar 14 relatórios dinâmicos com todos os dados do levantamento.

4 CONCLUSÕES

A adoção de tecnologias de precisão pelas fazendas brasileiras ainda é considerada baixa, o que demonstra grande potencial para as fazendas melhorarem sua gestão e otimizar o processo produtivo. Os principais motivos para a não adoção de tecnologias de precisão são relacionados às questões econômicas e à falta de familiaridade do produtor com as tecnologias. O presente estudo aponta para uma maior produtividade em fazendas com maiores níveis de uso de tecnologia. Em geral, as preocupações relacionadas à integração de dados, ao retorno do investimento e à facilidade de uso, indicadas por produtores do Brasil, são similares aos desafios reportados em levantamentos realizados em outros países. Aumentar a disponibilidade de suporte técnico aos produtores pode ter impacto positivo na adoção de tecnologias de precisão nas fazendas leiteiras brasileiras.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa; a Guilherme Fernando Mattos, Castrolanda, Paraná; a Renê Granato, COTRIJAL, Rio Grande do Sul; a Christiano Nascif, Labor Rural, Minas Gerais; a Marcelo Pereira de Carvalho, Milkpoint, São Paulo; à Associação Brasileira dos Criadores de Girolando, e à Associação dos Criadores de Gado Holandês de Minas Gerais, Minas Gerais, pelo apoio na aplicação da pesquisa. Um agradecimento especial aos 448 produtores de leite brasileiros que dedicaram tempo para responder à pesquisa.

REFERÊNCIAS

ARTHUR, D.; VASSILVITSKII, S. K-means++: the advantages of careful seeding. In: ANNUAL ACM-SIAM: SYMPOSIUM ON DISCRETE ALGORITHMS, 2007, New Orleans, LA. **Proceedings [...]**. New York: ACM, 2007. p. 1027-1035.

BERCOVICH, A.; EDAN, Y.; ALCHANATIS, V.; MOALLEM, U.; PARMET, Y.; HONIG, H.; MALTZ, E.; ANTLER, A.; HALACHMI, I. Development of an automatic cow body condition scoring using body shape signature and Fourier descriptors. **Journal of Dairy Science**, v. *96*, n. 12, p. 8047-8059, 2013. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2013-6568.

BORCHERS, M. R.; BEWLEY, J. M. An assessment of producer precision dairy farming technology. **Journal of Dairy Science**, v. *98*, n. 12, p. 4198-4205, 2015. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2014-8963.

BOWEN, J. M; HASKELL, M. J.; MILLER, G. A.; MASON, C. S.; BELL, D. J.; DUTHIE, C. A. Early prediction of respiratory disease in preweaning dairy calves using feeding and activity behaviors. **Journal of Dairy Science**, v. *104*, n. 11, p. 12009-12018, 2021. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2021-20373.

HAMILTON, A. W.; DAVISON, C.; TACHTATZIS, C.; ANDONOVIC, I.; MICHIE, C.; FERGUSON, H. J.; SOMERVILLE, L.; JONSSON, N. N. Identification of the rumination in cattle using support vector machines with motion-sensitive bolus sensors. **Sensors**, v. *19*, n. 5, p. 1165-1179, 2019. DOI: http://doi.org/10.3390/s19051165.

JOSHI, K. H.; MASON, A.; KOROSTYNSKA, O.; AL-SHAMMA'A. A. Milk quality monitoring using electromagnetic wave sensors. In: MUKHOPADHYAY, S. C.; POSTOLACHE, O. A.; JAYASUNDERA, K. P.; SWAIN, A. K. (ed.). **Sensors for everyday life**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 205-227.

MEUNIER, B.; PRADEL, P.; SLOTH, K. H.; CIRIÉ, C.; DELVAL, E.; MIALON, M. M.; VEISSIER, I. Image analysis to refine measurements of dairy cow behaviour from a real-time location system. **Biosystems Engineering**, v. *173*, p. 32-44, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.08.019.

RUTTEN, C. J.; VELTHUIS, A. G. J.; STEENEVELD, W.; HOGEVEEN, H. Sensors to support health management on dairy farms. **Journal of Dairy Science**, v. *96*, p. 1928-1952, 2013. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2012-6107.

SILVA, S. R.; ARAUJO, J. P.; GUEDES, C.; SILVA, F.; ALMEIDA, M.; CERQUEIRA, J. L.; SALAMA, K. Precision technologies to address dairy cattle welfare: focus on lameness, mastitis and body condition. **Animals**, v. *11*, n. 8, p. 2253-2270, 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/ani11082253.

SILVI, R.; PEREIRA, L. G. R.; PAIVA, C. A. V.; TOMICH, T. R.; TEIXEIRA, V. A.; SACRAMENTO, J. P.; FERREIRA, R. A. P.; COELHO, S. G.; MACHADO, F. S.; CAMPOS, M. M.; DÓREA, J. R. R. Adoption of precision technologies by Brazilian dairy farms: the farmer's perception. **Animals**, v. *11*, n. 12, p. 3488, 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/ani11123488.

SORDI, V. F.; VAZ, S. C. M. Os principais desafios para a popularização de práticas inovadoras de agricultura inteligente. **Desenvolvimento em Questão**, v. *19*, p. 204-217, 2021. DOI: http://doi.org/10.21527/2237-6453.2021.54.204-217.

SOUZA, R. S.; RESENDE, M. F. S.; FERREIRA, L. C. A.; FERRAZ, R. S.; ARAÚJO, M. V. V.; BASTOS, C. V.; SILVEIRA, J. A. G.; MOREIRA, T. F.; MENESES, R. M.; CARVALHO, A. U.; LEME, F. O. P.; FACURY FILHO, E. J. Monitoring bovine tick fever on a dairy farm: An economic proposal for rational use of medications. **Journal of Dairy Science**, v. *104*, n. 5, p. 5643-5651, 2021. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2020-19504.

SPOLIANSKY, R.; EDAN, Y.; PARMET, Y.; HALACHMI, I. Development of automatic body condition scoring using a low-cost 3-dimensional Kinect camera. **Journal of Dairy Science**, v. *99*, n. 9, p. 7714-7725, 2016. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2015-10607.

STEENEVELD, W.; HOGEVEEN, H. Characterization of Dutch dairy farms using sensor systems for cow management. **Journal of Dairy Science**, v. *98*, n. 1, p. 709-717, 2015. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2014-8595.

TEIXEIRA, V. A.; LANA, A. M. Q.; BRESOLIN, T.; TOMICH, T. R.; SOUZA, G. M.; FURLONG, J.; RODRIGUES, J. P. P.; COELHO, S. G.; GONÇALVES, L. C.; SILVEIRA, J. A. G.; FERREIRA, L D.; FACURY FILHO, E. J.; CAMPOS, M. M.; DÓREA, J. R. R.; PEREIRA, L. G. R. Using rumination and activity data for early detection of anaplasmosis disease in dairy heifer calves. **Journal of Dairy Science**, v. *105*, n. 5, p. 4421-4433, 2022. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2021-20952.

TIBSHIRANI, R.; WALTHER, G.; HASTIE, T. Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic. **Journal of the Royal Statistical Society. Series B, Statistical Methodology**, v. *63*, n. 2, p. 411-423, 2001. DOI: http://doi.org/10.1111/1467-9868.00293.

TZOUNIS, A.; KATSOULAS, N.; BARTZANAS, T.; KITTAS, C. Internet of things in agriculture, recent advances and future challenges. **Biosystems Engineering**, v. *164*, p. 31-48, 2017. DOI: http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007.

81

Desafios e oportunidades para produção de leite em sistema de ordenha voluntária a pasto

Challenges and Opportunities for Milk Production in Pasture-based Voluntary Milking Systems

Teresa Cristina Alves[1], André Luiz Monteiro Novo[2], Sophia Aparecida Morro Chamilete[3], Ketlin Paôla Breunig[4]

[1] *Pesquisadora, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, teresa.alves@embrapa.br.*

[2] *Analista, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, andre.novo@embrapa.br.*

[3] *Aluna de Mestrado em Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual Paulista, Araraquara (SP), Brasil, sophiaapmorro@gmail.com.*

[4] *Aluna de Graduação em Medicina Veterinária, Universidade Estadual do Norte do Paraná, Bandeirantes (PR), ketlin.breunig@outlook.com*

RESUMO

Os sistemas de ordenha voluntária (VMS) surgiram com o intuito de promover maior eficiência no trabalho, aumentar a produção por vaca e melhorar o estilo de vida das famílias produtoras de leite. A crescente popularidade dessa tecnologia é evidenciada pela rápida taxa de adoção. A maioria dos VMS está instalada em confinamento, porém há também sistemas voluntários a pasto, principalmente na Nova Zelândia e Austrália. A Embrapa Pecuária Sudeste foi a primeira instituição de pesquisa da América Latina a realizar ordenha voluntária em sistema de pastejo integrado durante todo o ano em clima tropical. Esse sistema foi idealizado com o objetivo de atender as demandas de produtores que buscam uma produção de leite sustentável e melhor qualidade de vida. Esse sistema está em funcionamento desde 2021 e, dentre os principais desafios, destacam-se: definição da localização e do *layout* do galpão de ordenha; frequência de visitas; definição dos módulos de pastejo; fornecimento de concentrado; balanceamento de dieta com as diversas fontes de alimentos; ingestão de água; deslocamento do rebanho para manejo e tratamento; mão de obra; transição entre os sistemas; e seleção de animais. O VMS da Embrapa Pecuária Sudeste foi alocado em área de 16 hectares de integração, cuja divisão das áreas e estrutura de corredores de entrada ao sistema foram definidas de forma que os animais tivessem fácil acesso e que permitisse o repasse com outras categorias nos piquetes pastejados. No verão, período quente e úmido, os animais são alimentados exclusivamente com volumoso proveniente do pastejo. Já durante o inverno, período frio e seco, além do pastejo, as vacas recebem suplementação volumosa de silagem de milho no cocho. Em ambos os períodos parte do concentrado (cerca de 70%) é fornecido no VMS e parte distribuído no cocho para todo o lote. Em média 58 animais são ordenhados diariamente, apresentando produção de leite em torno de 18,84 kg/animal/dia, tempo de ordenha de 7 min 23 s/animal/ordenha e frequência de 1,75 ordenhas/animal/dia. O sistema ainda não atingiu sua ocupação máxima e estima-se que a plena utilização do equipamento comporte cerca de 90 animais. O número de visitas diárias por vaca ao VMS depende de fatores, como estágio de lactação, composição do grupo, número de partos, raça e produção de leite. O fornecimento de concentrado e água no VMS é considerada a estratégia mais eficaz para atrair as vacas ao sistema. Normalmente, em sistemas a pasto, são utilizados animais de genética adaptada ao pastejo. Consequentemente, esses animais apresentam menor frequência de ordenha, permitindo que o sistema suporte um maior número de animais. O período de adaptação das vacas ao VMS costuma apresentar variações entre as fazendas. Na Embrapa Pecuária Sudeste, em 45 dias, 95% dos animais estavam frequentando a ordenha de forma voluntária. Dessa forma, conclui-se que, apesar do curto período de avaliação, foi possível perceber as vantagens de um sistema de ordenha voluntária. A condução de pesquisas com VMS a pasto em áreas tropicais pode oferecer importantes orientações aos produtores que pretendem maximizar a produção, o bem-estar animal e os lucros.

Palavras-chave: automatização; bovinocultura leiteira; obstáculos.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000062

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

ABSTRACT
Voluntary milking systems (VMS) were developed to try to promote greater labour efficiency, increased production per cow and improved quality of life of dairy farming families. The growing popularity of this technology is evidenced by its rapid adoption in developed countries. The majority of VMS are installed in confinement, although there are also voluntary grazing systems, which are mainly found in New Zealand and Australia. Embrapa Southeast Livestock was the first research institution in Latin America to implement voluntary milking in a year-round integrated pasture system (crop-livestock and trees) in a tropical climate. This system was designed to meet the needs of farmers aiming for sustainable milk production and improved quality of life. The system has been operational since 2021, during which time a number of challenges have been identified. These include defining the location and layout of the milking shed, frequency of shed visits, grazing module definition, providing the right amount of concentrate, balancing the diet with different food sources, water intake, herd movement for management and treatment, labour, transition between systems and animal selection. The Embrapa Southeast Livestock VMS has been allocated a 16-hectare integration area. The division of its modules and the placement of the corridors within the system have been defined so as to ensure easy access for the animals and to allow other categories to graze in the paddocks. In summer, a period characterized by high temperature and humidity, animals are solely fed on pasture. Conversely, in winter, when the climate is cold and dry, cows receive a supplement of corn silage in the feed bunk, in addition to grazing. Throughout both seasons, around 70% of the concentrate is delivered via the Automatic Milking System (AMS), while the remaining portion is offered in the feed bunk to the entire group. A daily average of 58 animals are milked, yielding an average milk production of 18.84 kg/animal/day. The milking process takes 7 min and 23 s/animal/milking, with a milking frequency of 1.75 times/animal/day. The system has not yet reached its maximum occupancy, with an estimated capacity of around 90 animals. The number of daily visits per cow to the VMS is influenced by a number of factors, including lactation stage, group composition, number of births, breed, and milk production. Providing concentrate and water in the VMS is considered the most effective strategy for attracting cows to the system. In pasture-based systems, animals with genetics adapted to grazing are typically used. Consequently, these animals have a lower milking frequency, which allows the system to support a greater number of animals. The adaptation period for cows to the VMS tends to vary between farms. At Embrapa Southeast Livestock, at 45 days, 95% of the animals were voluntarily milking. Therefore, despite the short evaluation period, it was possible to verify the advantages of a voluntary milking system. The implementation of pasture VMS research in tropical areas can provide valuable insights for producers seeking to optimise production, animal welfare, and profits.

Keywords: automation; dairy cattle farming; obstacles.

1 INTRODUÇÃO

A ordenha voluntária ganhou ampla aceitação, particularmente na Europa Ocidental, como estratégia de reduzir o trabalho nas fazendas leiteiras, aumentar a produção por vaca e melhorar o estilo de vida das famílias que ordenham de 40 a 250 vacas por dia (De Koning, 2011). A crescente popularidade dessa tecnologia é evidenciada pela rápida taxa de adoção. No Brasil, o primeiro VMS (Paiva et al., 2015) entrou em operação em 2012. No ano de 2015, já havia mais de uma dezena de ordenhas robotizadas e até o final de 2024 estão previstas 650 unidades no país. A adoção generalizada demonstra sucesso em ajudar os produtores de leite a obter maior eficiência no trabalho e um estilo de vida melhor, mas a experiência de campo indica que há uma grande variação na quantidade de trabalho economizado e na satisfação geral dos primeiros adotantes (Rodenburg, 2017). No Brasil, a realidade de carência de mão de obra qualificada para a ordenha não é diferente. Para muitos produtores, independentemente da escala de produção, a questão de recursos humanos é sempre o motivo principal da saída da atividade leiteira (Novo et al., 2012).

No mundo todo, a maioria dos sistemas de ordenha voluntária (VMS) está instalada em confinamento. Existem três principais tipos de sistemas de produção. No sistema confinado, os animais permanecem estabulados e sua alimentação é fornecida exclusivamente no cocho. Já nos sistemas semiconfinados, há variações: os animais podem ficar confinados apenas parte do dia e passar o restante do tempo em áreas externas, com sua dieta composta parcialmente por pastagem e parcialmente por suplementação de volumoso e concentrado no cocho. Em outros casos, os animais permanecem apenas em área externa, mas ainda recebem a dieta exclusivamente no cocho. Por fim, no sistema a pasto, os animais ficam em piquetes de pastagem, sendo suplementados com concentrado durante o período das águas e com concentrado e volumoso durante a seca. Na literatura, grande parte das informações sobre manejo e gerenciamento de VMS a pasto é proveniente de pesquisas realizadas na Nova Zelândia e, principalmente, na Austrália. A Embrapa Pecuária Sudeste foi a primeira instituição de pesquisa da América Latina a planejar e implantar um sistema de ordenha voluntária em sistema de pastejo integrado durante todo o ano em clima

tropical. O VMS está em funcionamento desde o início de 2021 e, desde então, vem tentando responder perguntas para aplicação prática desse sistema de ordenha na realidade das fazendas brasileiras. Pelo seu caráter inovador, em particular em áreas tropicais, alguns desafios estão presentes, tais como: definição da localização e do *layout* do galpão de ordenha; frequência de visitas das vacas ao longo do ano; definição dos módulos de pastejo; logística dos trajetos dos animais; fornecimento de concentrado exclusivamente na ordenha; balanceamento de dieta com as diversas fontes de alimentos (pasto); ingestão de água; deslocamento do rebanho para manejo e tratamento; adaptação e capacitação de mão de obra para o novo sistema; processo de transição entre o sistema convencional e o VMS; e recursos genéticos para maior eficiência no novo sistema.

2 VMS EM SISTEMA INTEGRADO A PASTO - EMBRAPA PECUÁRIA SUDESTE

A implantação do VMS na Embrapa Pecuária Sudeste foi idealizada com o intuito de atender a demandas de produtores que buscam por tecnologias de ruptura para produção de leite sustentável e melhor qualidade de vida. No Programa Balde Cheio, foi possível observar que o aumento de produção de leite por propriedade é expressivo até o limite da disponibilidade de mão de obra, mesmo em um contexto de área disponível para expansão e recursos para investimento em mais vacas e instalações.

Para tanto, foi aberta uma chamada pública para celebração de contrato de cooperação técnica-financeira com empresa do setor produtivo, que visava a desenvolvimento, validação e transferência de tecnologia para sistemas automatizados de ordenha a pasto em sistemas integrados de produção de leite nas condições tropicais. A empresa DeLaval foi a ganhadora e iniciou-se o processo de concessão em comodato dos equipamentos.

O VMS foi alocado estrategicamente em área de 16 hectares (ha) de integração divididos da seguinte forma: Integração-Pecuária-Floresta (IPF) 5,6 ha, Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) 5,8 ha e Integração-Lavoura-Pecuária (ILP) irrigado 4,6 ha (Figura 1). Os sistemas ILPF e IPF são compostos por eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora*), com distância entre linhas de 25 metros e entre árvores, de 3 metros, e capim paiaguás (*Urochloa brizantha* cv. Paiaguás), além de ILP irrigado (inicialmente com braquiária e, posteriormente, substituída por *Panicum maximum* cv. Tamani). No inverno, é realizada a sobressemeadura com aveia branca forrageira IPR Esmeralda (*Avena sativa* cv. IPR Esmeralda) no ILP irrigado. A divisão das áreas e estrutura de corredores de entrada aos diferentes sistemas foram definidas de forma que os animais tivessem fácil acesso e que permitisse o repasse com outras categorias nos piquetes pastejados. Os piquetes não possuem tamanho fixo, sendo dimensionado de acordo com a época do ano, o número de animais e o tempo que passarão em pastejo.

O pastejo é definido de forma que os animais pastejem em uma área de cada sistema por dia em lote único, passando os períodos mais quentes em sistema arborizado (Figura 2) e, durante a noite, em sistema sem árvores. No verão, período quente e úmido,

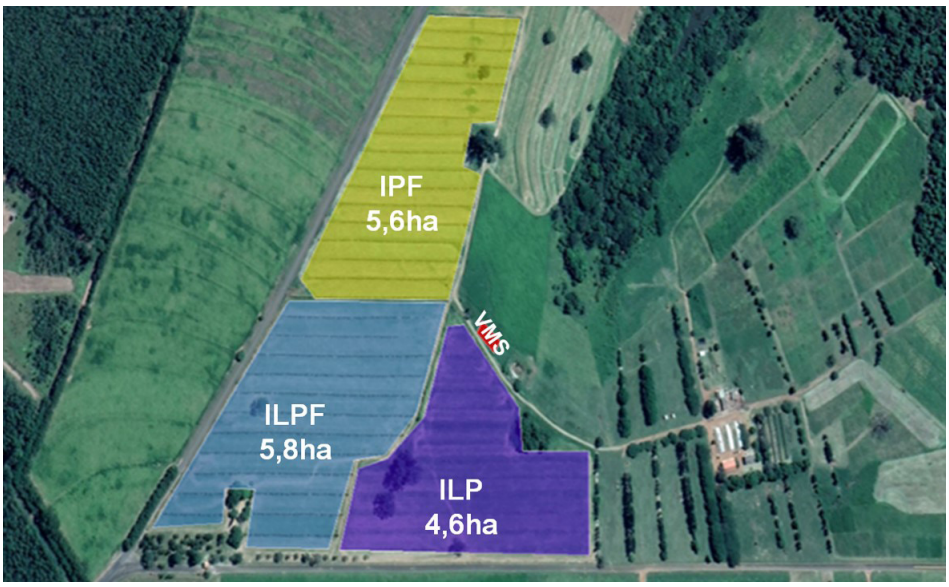


Figura 1. Mapa da área de pastejo das vacas em lactação ordenhadas no VMS.

Figura 2. Vacas leiteiras em piquete de pastejo sombreado.

os animais recebem 100% de volumoso proveniente do pastejo. No inverno, período seco e frio, os animais durante o dia pastejam áreas sombreadas e durante a noite pastejam área sobressemeada com aveia (ILP), recebendo suplementação volumosa com silagem de milho.

O fornecimento de concentrado é feito no VMS (em média 70% do total do concentrado) e o restante é fornecido em cocho tipo trenó para todo o lote. No período do verão, os animais recebem apenas o concentrado no cocho e, no inverno, concentrado mais silagem de milho.

Os animais que compõem o rebanho são das raças Holandês e Jersolando apresentando diferentes graus sanguíneos entre as duas raças. No ano de 2019, iniciou-se o uso de sêmen proveniente da Nova Zelândia, de animais das raças Frísio, Jersey e Kiwi cross, bem mais adaptados ao pastejo e com alta eficiência reprodutiva, com o objetivo de promover melhor adaptação dos recursos genéticos ao modelo do sistema de produção planejado. A média de animais ordenhados diariamente entre 2021 a 2024 foi de 58 animais com produção de leite de 18,84 kg leite/dia, tempo de ordenha de 7 min 23 s por vaca e frequência de ordenha de 1,75 ordenha/animal/dia. O VMS ainda não atingiu sua ocupação máxima, e estima-se que a plena utilização do equipamento comporte cerca de 90 animais.

3 DEFINIÇÃO DA LOCALIZAÇÃO E DO *LAYOUT* DO GALPÃO DE ORDENHA

Muitos fatores devem ser avaliados no sistema para definir o *layout* do galpão de ordenha, dentre os quais: *layout* físico da propriedade; instalações já existentes; perspectiva de expansão futura; fluxo de animais e de materiais; localização dos silos para armazenamento de concentrado; estratégia de remoção de esterco; área para contenção de animais; estratégia de agrupamento dos animais; clima; ventos; requisitos de mão de obra e manejo, e sistema de resfriamento para as vacas (Halachmi, 2004).

Todos esses fatores inter-relacionados são importantes e devem ser levados em consideração, porém é difícil quantificar seus efeitos entre si e na produtividade do sistema. Outro fator importante que deve ser considerado no desenvolvimento do projeto é a busca voluntária, pela área de ordenha, várias vezes ao dia, em resposta ao relógio biológico dos animais, uma vez que nesse sistema não há a intervenção do ordenhador. As visitas voluntárias à ordenha robótica equilibram o uso das instalações ao longo do dia e da noite, e estabelecem um processo aleatório de tempo contínuo (Halachmi et al., 2000).

A localização do galpão do VMS na Embrapa foi definida considerando as áreas de pastejo do sistema integrado. O galpão ficou posicionado de forma centralizada para que a distância entre os piquetes mais afastados não ultrapassasse 600 metros. O *layout* do galpão foi estabelecido para que os animais pudessem transitar entre os três sistemas de pastejo, a área de alimentação e a área de manejo de forma independente (Figura 3).

4 FREQUÊNCIA DE VISITAS

O retorno máximo sobre o investimento de um VMS é obtido, em teoria, quando as vacas adaptam sua própria rotina diária e o tráfego ao redor do sistema, resultando na plena utilização do equipamento com pouca, ou nenhuma, intervenção humana (Bach; Cabrera, 2017). Um trabalho realizado no Canadá, com animais confinados, relatou que 4 a 25% das vacas tiveram de

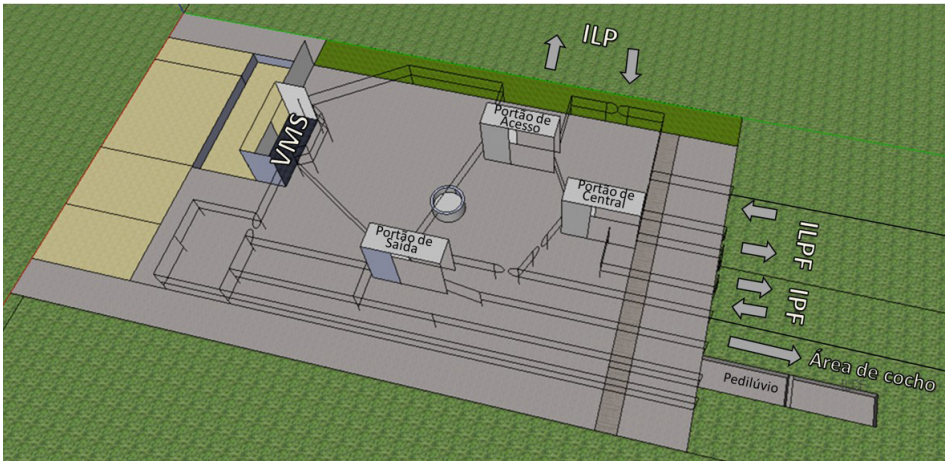


Figura 3. Demonstração dos acessos de entrada ao Galpão do VMS e retorno para os piquetes de pastejo.

ser encaminhadas ao VMS para ordenha (Gygax et al., 2007). A busca de animais para serem ordenhados nesse sistema tem custos importantes, tanto de mão de obra quanto na perda de produção, e normalmente ocorre redução dos lucros esperados. Dessa forma, dentre os aspectos fundamentais para tornar esse sistema lucrativo, está maximizar a frequência de ordenhas voluntárias e minimizar a necessidade de encaminhar vacas para o VMS.

O fornecimento de concentrado no VMS é a estratégia mais eficaz para atrair vacas e minimizar a busca, uma vez que os animais, se puderem escolher, escolherão a alimentação em vez da ordenha (Prescott et al., 1998). Vacas em sistema de ordenha voluntária a pasto têm menor frequência de ordenha do que vacas em sistema estabulado (van Dooren et al., 2002; Spörndly; Wredle, 2002). Assim, além do fornecimento do concentrado, o fornecimento de água apenas no galpão é outra estratégia utilizada para atrair os animais para o VMS (van Dooren et al., 2002; Krohn; Munksgaard, 2004; Spörndly; Wredle, 2005).

Quando se fala em VMS a pasto, outro fator que deve ser levado em consideração é o tipo de animal que será utilizado no sistema. Normalmente, são utilizadas vacas de genética adaptada ao pastejo, sendo mais resistentes ao estresse térmico, a caminhadas, e com menor produção total de leite do que vacas estabuladas. Este fato promove menor frequência de ordenha, permitindo que o sistema suporte um maior número de animais. Fazendas com sistemas confinados atingiram produção média diária de leite por vaca ordenhada no VMS de 33,7 kg (King et al., 2016), 32,0 kg (Tremblay et al., 2016), 33,2 kg (Siewert et al., 2018) e 37,6 kg (Pieter et al., 2019). A produção total de leite diária por unidade de VMS foi relatada entre 1.627 kg e 2.224 kg (King et al., 2016; Tremblay et al., 2016; Siewert et al., 2018; Pieter et al., 2019). Em fazendas VMS, foi relatada uma frequência de ordenha entre 2,4 e 3,0 por vaca por dia (Wagner-Storch; Palmer, 2003; King et al., 2016; Siewert et al., 2018).

Na Embrapa Pecuária Sudeste, no primeiro ano de funcionamento, foi observada frequência de ordenha de 1,84 ordenhas/dia, sendo mais alta no período de inverno, quando os animais recebiam suplementação de volumoso no cocho. O concentrado oferecido ao animal no VMS e a natureza voluntária do sistema possibilita que a frequência de ordenha seja maior quando comparada a sistemas de ordenha convencionais. De acordo com Tremblay et al. (2016) e Siewert et al. (2018), o aumento da frequência de ordenha está associado ao aumento da produção de leite por vaca. Na Embrapa Pecuária Sudeste, contatou-se que entre 2021 a 2024, o tempo de duração de ordenha foi em média de 7 min 23 s para vacas apresentando média de produção de leite de 18,84 kg/dia.

Outro fator que deve ser considerado para o aumento da frequência das visitas voluntárias é o conforto da vaca durante a ordenha. Para isso, é necessário garantir que a área ao redor do robô esteja livre de tensão. Dessa forma, faz-se importante a presença de ventiladores de teto sobre a vaca na cabine de ordenha para resfriar e manter as moscas afastadas, o piso de borracha na cabine de ordenha, a entrada nivelada ou próxima para a cabine, e o ajuste adequado da cabine ao tamanho dos animais, para que as vacas possam ficar em pé confortavelmente (Rodenburg, 2017)..

5 DEFINIÇÃO DOS MÓDULOS DE PASTEJO

Em muitos países, principalmente nos de clima tropical, pastagens são parte integrante do sistema de produção de leite. A pastagem bem manejada oferece à vaca um alimento de boa qualidade com baixo custo. Além disso, pode melhorar a saúde do animal,

em relação aos distúrbios nos membros e nos cascos, além de diminuir o número de tratamentos veterinários (Gustafson, 1993). Atualmente, a produção de leite em sistema de pastejo não só é uma questão de bem-estar animal, como também é uma demanda importante de consumidores em muitos países.

Em VMS com vacas em pastejo, a situação de alimentação é completamente diferente dos sistemas estabulados. Como o pasto pode oferecer alimentos de alta qualidade e facilmente disponíveis ao redor das vacas, pode ser difícil motivar os animais a caminharem do pasto até o galpão para serem ordenhados. A situação ideal para animais em ordenha voluntária sob pastejo é que as vacas entrem e saiam do galpão em um fluxo constante dia e noite. Assim, os animais devem ser encorajados a agir de forma independente caminhando entre o pasto e o galpão várias vezes ao dia (Spörndly; Wredle, 2004). No entanto, isso pode ser difícil de conseguir a pasto, especialmente quando a área de pastagem está situada distante do galpão. Pesquisas mostram que vacas em VMS apresentaram maior produção de leite e maior frequência de ordenha quando a pastagem estava a apenas 50 metros do galpão, em comparação com as que pastejavam a uma distância de 260 metros (Spörndly; Wredle, 2004).

Em sistemas de pastejo, nos quais os animais, no período de verão, recebem volumoso apenas no pasto, a distância entre o piquete de pastejo e o galpão do VMS é um gargalo para a manutenção da frequência de ordenha, principalmente nos dias mais quentes. Na Embrapa Pecuária Sudeste, os piquetes mais distantes de pastejo estão a aproximadamente 600 metros do galpão de ordenha, e o grande desafio é fornecer pasto de qualidade na quantidade suficiente para que o animal sinta necessidade de buscar um novo pasto e, para isso, passe pelo galpão de ordenha. É importante que no planejamento do pastejo seja levada em consideração a distância entre os piquetes que serão pastejados, para minimizar a perda de energia pelo deslocamento, ou seja, quando, em um dos sistemas, o animal estiver no piquete mais distante do galpão de ordenha, no outro sistema deve estar em um piquete próximo do mesmo.

Em sistemas a pasto, o balanceamento da dieta das vacas em lactação é um fator que deve ser definido considerando as exigências nutricionais dos animais, como idade, raça, fase da lactação e estado reprodutivo, além das adversidades climáticas e da composição bromatológica do alimento que será ofertado. Sabendo disso, deve ser realizado o balanço dos alimentos para verificar se os mesmos suprem as necessidades dos animais e, caso não, pode ser realizada uma adição suplementar para fornecer toda a demanda que as vacas precisam para mantença e produção.

6 FORNECIMENTO DE CONCENTRADO

Na maioria dos VMS, as vacas recebem concentrado na unidade de ordenha, visto que é uma motivação para os animais visitarem o sistema automatizado. Em muitos casos, as vacas precisam passar pela unidade de ordenha ou por um portão de seleção para entrarem na área de alimentação, onde são oferecidos volumosos e, em alguns casos, mais concentrado, ou são direcionadas para um novo sistema de pastejo.

Em sistemas a pasto, como não é fornecida a ração completa no cocho, o fornecimento de concentrado adicional para as vacas demanda investimento, ou em alimentadores para que os animais recebam o concentrado de forma individual, de acordo com sua produção, ou em mão de obra para o fornecimento de ração para todo o lote. O uso de subprodutos que não possam ficar muito tempo acondicionados no silo ou de ingredientes que segregam do concentrado quando ficam armazenados é um fator que limita o fornecimento de concentrado em sistemas automatizados, sendo necessário o fornecimento desses ingredientes em cocho para o lote. Esse manejo interfere na voluntariedade dos animais, uma vez que todos os animais têm de ser direcionados ao mesmo tempo para a área de cocho para que todos tenham a oportunidade de consumir a mesma quantidade de alimento.

Pensando em redução de custo e otimização de mão de obra, o ideal seria que as vacas conseguissem consumir todo o concentrado necessário durante as ordenhas. Porém, dados de literatura mostram que quando a oferta de concentrado é alta (ou seja, maior que 4 kg/dia), a quantidade de sobras parece aumentar à medida que a oferta de concentrado aumenta (Bach; Cabrera, 2017).

O período de permanência do animal na cabine de ordenha, em média 7 minutos (Castro et al., 2012), deve ser considerado para que se mantenha o fluxo contínuo de animais e a quantidade de concentrado fornecida por ordenha seja consumida dentro desse período, não havendo sobras. Outro fator que influencia no tempo de consumo do concentrado é a "apresentação". O concentrado peletizado tende a ser consumido mais rápido, porém tem maior custo. Uma alternativa para aumentar o tempo de consumo em rações concentradas é a adição de água ao concentrado no momento do fornecimento. A DeLaval viabilizou a adição de água no cocho de fornecimento de concentrado da cabine do sistema automatizado instalado na Embrapa Pecuária Sudeste e isso possibili-

tou o aumento no consumo, tornando possível o fornecimento de concentrado apenas no VMS.

7 INGESTÃO DE ÁGUA

A água é um elemento essencial para a produção de leite e a discussão sobre os pontos de fornecimento para as vacas em VMS sob pastejo ocorre desde os anos 2000. Preocupações podem ser levantadas, como, por exemplo, se o fornecimento de água apenas no galpão de ordenha pode limitar a ingestão de água pelas vacas e ter um efeito negativo na produção de leite. De acordo com o National Research Council (2001), a produção de leite pode ser severamente diminuída se a disponibilidade de água for limitada. Entretanto, é difícil afirmar que oferecer água apenas no galpão da ordenha é limitar a disponibilidade de água, uma vez que as vacas podem retornar ao galpão para beber água a qualquer momento. Por outro lado, pode-se alegar que os animais que também recebem água no campo podem não vir à unidade de ordenha com frequência suficiente para manter um alto nível de produção de leite. Neste caso, as menores frequências de ordenha poderiam reduzir a produção de leite e aumentar a necessidade de busca ativa dos animais, gerando mais mão de obra.

Pesquisas concluíram que o número médio de ordenhas por dia foi menor no período de verão, quando as vacas estavam em sistema de pastejo, do que no período de inverno, quando os animais estavam estabulados (van Dooren et al., 2002; Spörndly; Wredle, 2002). Tal fato também foi constatado no sistema de ordenha robotizada a pasto da Embrapa Pecuária Sudeste. A prática de oferecer água aos animais em VMS somente no galpão também foi relatada em pesquisas realizadas na Dinamarca e Suécia (van Dooren et al., 2002; Krohn; Munksgaard, 2004). Entretanto, o trabalho realizado por Spörndly e Wredle (2004) demonstrou que vacas em VMS podem relutar em caminhar distâncias tão curtas quanto 260 metros e que uma longa distância entre o estábulo e o pasto pode ter efeitos negativos na produção de leite. Por outro lado, resultados de outro trabalho realizado por esses pesquisadores suecos não mostraram diferenças na ingestão de água, na produção e na composição do leite entre os tratamentos com diferentes distâncias de caminhada entre o pasto e o galpão (Spörndly; Wredle, 2005). Neste experimento, foi observado que as vacas que não tinham água disponível no campo compensaram bebendo mais quando chegaram ao galpão. Isso indica que elas estavam com sede e que a sede pode ter sido um motivo importante para retornar ao galpão.

É importante ressaltar que as pesquisas descritas acima foram realizadas em países de clima temperado e que, nas condições de clima tropical, essas variáveis devem ser analisadas para que se possa indicar o manejo mais adequado para as vacas, priorizando a produção de leite e o bem-estar animal.

8 DESLOCAMENTO DO REBANHO PARA MANEJO E TRATAMENTO

O deslocamento de vacas para práticas de manejo em um rebanho de ordenha voluntária apresenta desafios quando o curral de manejo fica distante do galpão da ordenha. Há a necessidade de deslocamento de alguns animais, ou de todo o rebanho, para manejos, como: inseminação artificial, exame ginecológico, cuidados com o casco, flambagem de úbere, vacinação, entre outros tratamentos, que exigem planejamento por parte do produtor. Nesse caso, para manter o sistema automatizado trabalhando em seu potencial máximo, é necessária a segregação em lotes para que a ordenha robótica não fique totalmente inativa durante longos períodos. Em manejos individuais ou em pequenos grupos, o modelo de apartação do *software* permite que os animais sejam separados para o manejo. Assim, se o curral de manejo não for acoplado ao galpão, é interessante que haja uma área para contenção dos animais e realização de pequenas intervenções, como, por exemplo, realização de inseminação artificial.

9 EFEITOS DA ORDENHA VOLUNTÁRIA NA MÃO DE OBRA

Um estudo realizado na Alemanha, Bélgica, Dinamarca e Holanda analisou 107 fazendas com ordenha robótica (Mathijs, 2004) e relatou média de 20% de economia de mão de obra, com grande variação entre as propriedades. Fazendas holandesas que investiram em novos robôs de ordenha ou em novas salas de ordenha (Bijil et al., 2007) observaram que o dinheiro disponível para aluguel, depreciação, juros, mão de obra e lucro foi maior por fazenda em €15.566/ano, em laticínios convencionais; porém, foi maior por empregado em tempo integral em €12.953/ano, em fazendas de ordenha robotizada. Estudos estimam que pode haver uma redução de até 30% de horas trabalhadas em uma propriedade com 70 vacas (Santos, 2000). A principal mudança acontece na natureza do trabalho e não na quantidade, especialmente porque a rotina não é mais ditada pelos horários da ordenha, o que pode atrair uma nova classe de funcionários que, de outra forma, não consideraria trabalhar em uma pro-

priedade leiteira (Woodford et al., 2015). Na Embrapa Pecuária Sudeste, foi observada redução do número de funcionários dedicados à ordenha no dia, sendo atribuídas outras funções a eles.

Uma das demandas trabalhistas em sistemas robotizados é buscar vacas que não visitam o robô voluntariamente. Em sistemas confinados, a busca de uma ou duas vacas requer um esforço mínimo, entretanto, buscar um grande número de animais requer trabalho e interfere no trânsito voluntário para o robô. Pesquisadores canadenses analisaram 43 rebanhos ordenhados com sistemas robóticos (Rodenburg; House, 2007), nos quais os produtores relataram buscar 14,6 ± 10,4% das vacas pelo menos uma vez ao dia. Neste estudo, houve grande variação entre rebanhos, com média de 2,5% de vacas para os cinco melhores rebanhos e 41,6% de vacas para os cinco piores rebanhos. Minimizar o número de vacas a serem buscadas, mantendo um alto nível de conforto, saúde e produtividade desses animais, é uma meta importante para uma ordenha robótica bem-sucedida. Em sistemas a pasto, em que os animais ficam dispersos em diferentes piquetes, geralmente distantes do centro do sistema automatizado, não faz sentido prático a busca de animais para a ordenha. Nesse caso, animais que precisam ser buscados devem ser descartados do rebanho, melhorando a eficiência da mão de obra.

10 TRANSIÇÃO ENTRE OS SISTEMAS

Na transição de um sistema de ordenha convencional para um sistema robotizado, as vacas devem aprender a visitar o VMS fora de seus horários tradicionais e se habituarem aos sons e movimentos do braço robótico antes da primeira ordenha (Tse et al., 2018). O treinamento e a assistência nas primeiras semanas devem envolver um manejo tranquilo e contínuo, para que os animais se acostumem rapidamente ao novo ambiente. A quebra da rotina diária pode ser estressante para os animais e, dessa forma, afetar seu bem-estar, além de diminuir a produção de leite (Jacobs; Siegford, 2012). Na Embrapa Pecuária Sudeste, a adaptação dos animais ao VMS iniciou-se 75 dias antes do início da ordenha. Em uma primeira fase, todos os portões eram mantidos abertos e os animais, uma vez por dia, eram encaminhados ao galpão e circulavam de forma livre pelos portões e cabine de ordenha. Nesta fase, foram identificados os animais que melhor se adaptaram à rotina e os animais mais arredios, que se recusaram a circular pelo galpão. Em uma segunda etapa, 30 dias antes do dia zero (0), iniciou-se o fornecimento de ração farelada no cocho da cabine de ordenha para estimular a permanência dos animais na mesma e provocar uma interação positiva. A terceira etapa aconteceu 15 dias antes do início da ordenha, que consistiu em circular os animais com os portões em modo automático, para que eles aprendessem a esperar o tempo de abertura do portão. Faltando 12 dias para o início da ordenha, os animais passaram a receber alimento na cabine com os portões fechados.

O período de adaptação das vacas ao VMS costuma apresentar grandes variações entre as fazendas. Castro et al. (2012) observaram que o período médio de adaptação das vacas foi de 188 dias, enquanto Jacobs e Siegford (2012) observaram, em fazendas americanas, que 95% das vacas foram ordenhadas voluntariamente dentro de 30 dias. Na Embrapa Pecuária Sudeste, em 45 dias, 95% dos animais estavam frequentando a ordenha de forma voluntária. Assim, é de suma importância avaliar por quanto tempo o estresse, decorrente da transição, pode persistir. A duração da transição dependerá de fatores, como: planejamento adequado das instalações e conhecimento e capacitação de mão de obra para operá-lo (Hillerton et al., 2004). Hillerton et al. (2004) constataram que a maioria das propriedades que adotaram o sistema robotizado possuía condições abaixo do nível ideal de estrutura, planejamento e conhecimento. Essas condições ajudam a explicar porque algumas fazendas não obtêm sucesso com o sistema de ordenha voluntária.

Alguns estudos mostram que o VMS promove maior bem-estar aos animais, por proporcionar maior frequência de ordenha e diminuir a interação das vacas com humanos (Reinemann, 1999; Tranel et al., 2012; Walker et al., 2014). Outros estudos verificaram que houve um aumento no nível de estresse das vacas por meio da variabilidade da frequência cardíaca. Entretanto, o mesmo nível de estresse não foi observado quando medido o nível de cortisol (Hagen et al., 2005; Gygax et al., 2006).

Para que as vacas se adaptem ao VMS, é necessário haver motivação para que entrem na cabine de ordenha. As vacas não são mais ordenhadas em grupos, duas ou três vezes ao dia, e precisam ir ao VMS voluntariamente. Por esta razão, a visita das vacas à cabine deve ser vista como uma experiência atrativa e recompensadora, para garantir que as mesmas retornem. Na maioria dos sistemas automatizados, é oferecido um concentrado altamente palatável na cabine de ordenha para atrair uma visita. Mas, se o processo de ordenha ou mudanças ambientais forem estressantes para a vaca, a adição de uma recompensa concentrada pode não ser suficiente para incentivar visitas regulares à ordenha. Os animais que não visi-

tam o VMS por vontade própria devem ser fisicamente encaminhados ao sistema, o que aumenta o tempo de trabalho e o custo para o produtor. Dessa forma, torna-se importante quantificar o tempo necessário para que as vacas em transição se adaptem à ordenha no novo sistema.

Durante a primeira visita ao VMS, as vacas normalmente vocalizam, defecam e coiceiam antes da colocação da teteira, sugerindo desconforto, medo ou estresse com o novo ambiente de ordenha (De Passillé et al., 1995; Grandin, 1998). Em menos de 24 horas, observa-se diminuição desses comportamentos. Tal fato foi observado no VMS da Embrapa, no qual, na segunda ordenha, os animais já se mostraram receptivos ao equipamento. A rápida diminuição pode ser devida ao fato de as vacas se adaptarem à cabine de ordenha, ao ambiente de galpão e ao processo de ordenha robótico. Vacas primíparas se mostraram mais agitadas e exibiram maior número de coices (8,3 ± 2,5) em comparação com vacas multíparas (5,5 ± 0,6). Tais resultados, possivelmente, estão relacionados à menor estatura das vacas primíparas, o que permite que tenham mais espaço para se movimentarem na cabine de ordenha (Jacobs; Siegford, 2012).

Em relação à frequência de ordenha, Jacobs e Siegford (2012) observaram que, no dia 0, as vacas alcançaram apenas 2,1 ordenhas. Já nos dias que se seguiram, as mesmas atingiram média de três ordenhas/dia. Isso pode ter contribuído para a redução da produção de leite de 29 kg por vaca para 16 kg nas primeiras 24 horas; porém, após quatro dias, observaram uma recuperação, apresentando média de 32 kg/vaca/dia. Weiss et al. (2004) também relataram uma diminuição durante os primeiros eventos de ordenha VMS ao se fazer a transição de uma sala de ordenha convencional para uma robotizada.

Outra indicação de que as vacas se adaptaram rapidamente ao VMS foi o número de vacas ordenhadas voluntariamente. Uma semana após a introdução das vacas no ordenhador robótico, mais de 60% do rebanho estava ordenhando voluntariamente. Após duas semanas, mais de 75% do rebanho estava ordenhando voluntariamente e, após um mês, 95% do rebanho estava sendo ordenhado de forma voluntária. Em termos de mão de obra, isso significa que apenas cinco vacas precisaram ser retiradas a cada 12 horas para ordenha, enquanto o restante do rebanho passou pelos ordenhadores robóticos voluntariamente mais de 2,5 vezes por dia (Jacobs; Siegford, 2012). Weiss et al. (2004) relataram taxas de ordenha voluntária ligeiramente superiores a 97% após duas semanas de transição para um sistema de ordenha robotizada.

Rodenburg e House (2007) verificaram grande variação na ordenha voluntária entre 43 propriedades pesquisadas. Cinco rebanhos no topo da escala apresentaram média de 97,5% de vacas ordenhadas voluntariamente, enquanto cinco rebanhos na base tiveram uma média de 58,4%. Não foi encontrada nenhuma razão óbvia para tal variação, mas, possivelmente, no futuro, possa haver um protocolo adaptável e uma lista de recomendações disponíveis para produtores que cogitam a mudança para a ordenha robótica, maximizando o número de eventos de ordenha voluntária exibidos por cada rebanho em transição.

Um fator intrigante foi o aumento ao longo do tempo no número de passos e coices após a fixação do bico da teteira durante o processo de ordenha. Isso indica que se mostra importante investigar mais a fundo a taxa de adaptação de um sistema convencional a um sistema de ordenha voluntária. Devem-se considerar experimentos semelhantes, com a inclusão de vacas inadequadas, para determinar se esses resultados são consistentes com os achados de outras fazendas. Em resumo, as vacas se adaptaram rapidamente à ordenha do VMS. Dessa forma, nota-se que é de suma importância o treinamento prévio dos animais de acordo com os protocolos já existentes, além do treinamento dos funcionários.

11 SELEÇÃO DE ANIMAIS

Os produtores interessados em adquirir um VMS devem selecionar vacas eficientes e saudáveis, atentando-se para as inadequadas, isto é, vacas com má conformação de úbere e tetos irregulares ou cruzados, que dificultam a colocação da teteira pelo braço robótico, fato também que exige duas vezes mais a busca pelo teto (Jacobs; Siegford, 2012; Akhloufi, 2014). Além disso, devem ser selecionados animais que estejam adaptados de acordo com os sistemas – a pasto ou confinamento – em que o VMS está inserido.

Parâmetros de ordenhabilidade, como tempo e frequência de ordenha, são economicamente importantes, porque determinam a eficiência do VMS e permitem selecionar os animais com melhores perfis (Vosman et al., 2018). Vacas com menor tempo de ordenha irão permitir que mais vacas sejam ordenhadas e, consequentemente, haverá maior produção de leite. Um estudo realizado por Tremblay et al. (2016) relatou tempo médio de cabine de ordenha de 6,84 min/ordenha, 2,91 ordenhas/vaca e 50,5 vacas/robô ou 147 ordenhas/dia. A diminuição do tempo de cabine em 1 min/ordenha reduziria o tempo médio de ocupação para 5,84 min/ordenha. Dessa forma, os 147 minutos poupados poderiam ordenhar mais

8,65 vacas, sem diminuição do tempo livre ou da frequência de ordenha.

Com a crescente popularidade do sistema de ordenha robotizada, a frequência de ordenha individual da vaca, ou seja, a quantidade de vezes que ela é ordenhada, passou a ser coletada pelas agências de registro de leite e integrar esquemas de provas de touros. Deve-se enfatizar que a alta frequência de ordenha traz vantagens, como aumento da produção leiteira, a melhor saúde do úbere devido à remoção de contaminantes, o aumento do conforto do animal, além de possibilitar melhor observação nos casos de mastite e outras enfermidades (Vijayakumar et al., 2017). Perdas em produção de leite, aumento dos casos de mastite e redução nos lucros são alguns dos problemas relacionados com a frequência irregular de ordenha (Bach; Cabrera, 2017).

Conhecer as características individuais do animal, como a produtividade e o temperamento, permite adequar ações na gestão do rebanho, o que é refletido na produção de leite (Santos et al., 2018), gerando maior retorno do alto investimento. Atualmente, poucas pesquisas foram realizadas buscando melhorar a eficiência do robô por meio do gerenciamento estratégico das taxas de lotação e permissão de ordenha, e por meio da seleção de animais para tempo de ordenha e conformação de tetos. Novas pesquisas nesses segmentos e o potencial de selecionar a frequência de ordenha certamente resultarão em novas oportunidades para aprimorar os resultados da ordenha robotizada no que se refere à economia de mão de obra, bem como na produção de leite por cabine de ordenha e por vaca.

12 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar dos desafios relatados e encontrados no dia a dia, a instalação da ordenha robótica promove maior bem-estar dos animais, por proporcionar aumento da frequência de ordenha e, portanto, da produção de leite, além de diminuir a interação das vacas com humanos. Além disso, o VMS provê uma mudança na natureza do trabalho, visto que a rotina não é mais ditada pelos horários da ordenha, o que pode atrair uma nova classe de funcionários que, de outra forma, não consideraria trabalhar em uma propriedade leiteira.

Por fim, o desenvolvimento de pesquisas com VMS a pasto em áreas tropicais, em sistemas integrados de produção, é de grande relevância para que se possam definir orientações aos produtores que pretendem instalar o sistema ou aos que tenham o equipamento instalado, para que assim possam maximizar a produção, o bem-estar animal e os lucros.

REFERÊNCIAS

AKHLOUFI, M. A. 3D vision system for intelligent milking robot automation. In: INTELLIGENT ROBOTS AND COMPUTER VISION XXXI: ALGORITHMS AND TECHNIQUES, 2014, San Francisco, CA. **Proceedings [...]**. Bellingham: SPIE. 2014. v. *90250*. DOI: http://doi.org/10.1117/12.2046072.

BACH, A.; CABRERA, V. Robotic milking: Feeding strategies and economic returns. **Journal of Dairy Science**, v. *100*, n. 9, p. 7720-7728, 2017. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2016-11694.

BIJIL, R.; KOOISTRA, S. R.; HOGEVEEN, H. The profitability of automatic milking on Dutch dairy farms. **Journal of Dairy Science**, v. *90*, n. 1, p. 239-248, 2007. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(07)72625-5.

CASTRO, A.; PEREIRA, J. M.; AMIAMA, C.; BUENO, J. Estimating efficiency in automatic milking systems. **Journal of Dairy Science**, v. *95*, n. 2, p. 929-936, 2012. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2010-3912.

DE KONING, C. Automatic milking: Common practice on over 10,000 dairy farms worldwide. In: DAIRY RESEARCH FOUNDATION SYMPOSIUM, 2011, Camden, Australia. **Proceedings [...]**. Sydney: University of Sydney, 2011. p. 14-31.

DE PASSILLÉ, A. M.; RUSHEN, J.; MARTIN, F. Interpreting the behavior of calves in an open-field test: a factor analysis. **Applied Animal Behaviour Science**, v. *45*, n. 3-4, p. 201-213, 1995. DOI: http://doi.org/10.1016/0168-1591(95)00622-Y.

GRANDIN, T. The feasibility of using vocalization scoring as an indicator of poor welfare during cattle slaughter. **Applied Animal Behaviour Science**, v. *56*, n. 2-4, p. 121-128, 1998. DOI: http://doi.org/10.1016/S0168-1591(97)00102-0.

GUSTAFSON, G. M. Effects of daily exercise on the health of tied dairy cows. **Preventive Veterinary Medicine**, v. *17*, n. 3-4, p. 209-223, 1993. DOI: http://doi.org/10.1016/0167-5877(93)90030-W.

GYGAX, L.; NEUFFER, I.; KAUFMANN, C.; HAUSER, R.; WECHSLER, B. Milk cortisol concentration in automatic milking systems compared with auto-tandem milking parlors. **Journal of Dairy Science**, v. *89*, n. 9, p. 3447-3454, 2006. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72382-7.

GYGAX, L.; NEUFFER, I.; KAUFMANN, C.; HAUSER, R.; WECHSLER, B. Comparison of functional aspects in two automatic milking systems and auto-tandem milking parlors. **Journal of Dairy Science**, v. *90*, n. 9, p. 4265-4274, 2007. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2007-0126.

HAGEN, K.; LANGBEIN, J.; SCHMIED, C.; LEXER, D.; WAIBLINGER, S. Heart rate variability in dairy cows: influences of breed and milking system. **Physiology & Behavior**, v. *85*, n. 2, p. 195-204, 2005. DOI: http://doi.org/10.1016/j.physbeh.2005.03.019.

HALACHMI, I.; METZ, J. H. M.; MALTZ, E.; DIJKHUIZEN, A. A.; SPEELMAN, L. Designing the optimal robotic barn, part 1: quantifying facility usage. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. *76*, n. 1, p. 37-49, 2000. DOI: http://doi.org/10.1006/jaer.1999.0524.

HALACHMI, I. Designing the automatic milking farm in a hot climate. **Journal of Dairy Science**, v. *87*, n. 3, p. 764-775, 2004. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73220-8.

HILLERTON, J. E.; DEARING, J.; DALE, J.; POELARENDS, J. J.; NEIJENHUIS, F.; SAMPIMON, C. O.; MILTENBURG, J. D. H. M.; FOSSING, C. Impact of automatic milking on animal health. In: MEIJERING, A.; HOGEVEEN, H.; KONING, C. (ed.). **Automatic milking**: a better understanding. Netherlands: Wageningen Academic, 2004. p. 125-134. DOI: https://doi.org/10.3920/9789086865253_021.

JACOBS, J. A.; SIEGFORD, J. M. Lactating dairy cows adapt quickly to being milked by an automatic milking system. **Journal of Dairy Science**, v. *95*, n. 3, p. 1575-1584, 2012. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2011-4710.

KING, M. T. M.; PAJOR, E. A.; LEBLANC, S. J.; DEVRIES, T. J. Associations of herd-level housing, management, and lameness prevalence with productivity and cow behavior in herds with automated milking systems. **Journal of Dairy Science**, v. *9*, n. 11, p. 9069-9079, 2016. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2016-11329.

KROHN, C. C.; MUNKSGAARD, L. Results of partner 3. In: KONING, C. (ed.). **Automatic milking and grazing**: grazing strategies and their effect on animal welfare and system performance Deliverable D27. EU project "Implications of the introduction of automatic milking on dairy farms" (QLK5-2000-31006). Wageningen Academic Publishers, 2004. Disponível em: http://www.automaticmilking.nl. Acesso em: 6 dez. 2022.

MATHIJS, E. Socio-economic aspects of automatic milking: impact of automatic milking on animal health. In: MEIJERING, A.; HOGEVEEN, H.; DE KONING, C. (ed.). **Automatic milking**: a better understanding. The Netherlands: the Netherlands, 2004. p. 46-55. DOI: http://doi.org/10.3920/9789086865253_004.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Nutrient requirements of dairy cattle**. 7th ed. Washington, DC: National Academy of Sciences, 2001. p. 20.

NOVO, A.; JANSEN, K.; SLINGERLAND, M. The sugarcane-biofuel expansion and dairy farmers' responses in Brazil. **Journal of Rural Studies**, v. *28*, n. 4, p. 640-649, 2012. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2012.07.004.

PAIVA, C. A. V.; PERREIRA, L. G. R.; TOMICH, T. R.; POSSAS, F. P. **Sistema de ordenha automática**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2015. Cadernos Técnicos de Veterinária e Zootecnia, n. 79.

PIETER, M.; IRWIN, E.; GROEN, B.; SALFER, K. A.; ENDRES, M. I. Association of management practices, housing, milking speed, and robot visits with milk production per robot on free-flow automatic milking system farms. **Journal of Dairy Science**, v. 102, n. 159, 2019.

PRESCOTT, N.; MOTTRAM, T. T.; WEBSTER, A. J. F. Relative motivations of dairy cows to be milked or fed in a Y-maze and an automatic milking system. **Applied Animal Behaviour Science**, v. *57*, n. 1-2, p. 23-33, 1998. DOI: http://doi.org/10.1016/S0168-1591(97)00112-3.

REINEMANN, D. J. **Prospects for robotic milking in Wisconsin**. Wisconsin: University of Wisconsin Extension, 1999.

RODENBURG, J. Robotic milking: technology, farm design, and effects on work flow. **Journal of Dairy Science**, v. *100*, n. 9, p. 7729-7738, 2017. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2016-11715.

RODENBURG, J.; HOUSE, H. Observações de campo sobre layout e projeto de celeiro para ordenha robótica de vacas leiteiras. In: INTERNATIONAL DAIRY HOUSING CONFERENCE, 6., 2007, Mineapolis, USA. **Proceedings [...]**. Mineapolis: ASABE, 2007. p. 148-159.

SANTOS, M. V. **Sistemas de ordenha robotizados**: uma perspectiva europeia: parte 2. Piracicaba: MilkPoint, 2000. Disponível em: https://www.milkpoint.com.br/radar-tecnico/qualidade-do-leite/sistemas-de-ordenha-robotizados-8211-uma-perspectiva-europeia-8211-parte-2-16177n.aspx. Acesso em: 6 dez. 2022.

SANTOS, L. V.; BRUGEMANN, K.; EBINGHAUS, A.; KONIG, S. Genetic parameters for longitudinal behavior and health indicator traits generated in automatic milking systems. **Archiv fur Tierzucht**, v. *61*, n. 2, p. 161-171, 2018.

SIEWERT, J. M.; SALFER, J. A.; ENDRES, M. I. Factors associated with productivity on automatic milking system dairy farms in the Upper Midwest United States. **Journal of Dairy Science**, v. *101*, n. 9, p. 8327-8334, 2018. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2017-14297.

SPÖRNDLY, E.; WREDLE, E. **Automatic milking and grazing**: motivation to visit the milking robot: deliverable D26, EU project "Implications of the introduction of automatic milking on dairy farms" (QLK5-2000-31006). Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2002.

SPÖRNDLY, E.; WREDLE, E. Automatic milking and grazing: effects of distance to pasture and level of supplements on milk yield and cow behavior. **Journal of Dairy Science**, v. *87*, n. 6, p. 1702-1712, 2004. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73323-8.

SPÖRNDLY, E.; WREDLE, E. Automatic milking and grazing: effects of location of drinking water on water intake, milk yield, and cow behavior. **Journal of Dairy Science**, v. *88*, n. 5, p. 1711-1722, 2005. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72844-7.

TRANEL, L.; BENTLEY, J.; SCHULTE, K. Making successful decisions on robotic milking technology. **Iowa State University Animal Industry Report**, v. *9*, n. 1, p. 1-4, 2012. DOI: http://doi.org/10.31274/ans_air-180814-889.

TREMBLAY, M.; HESS J. P.; CHRISTENSON, B. M.; MCINTYRE, K. K.; SMINK, B.; VAN DER KAMP, A. J.; JONGL. G.; DÖPFER, D. Factors associated with increased milk production for automatic milking systems. **Journal of Dairy Science**, v. *99*, n. 5, p. 3824-3837, 2016. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.2015-10152.

TSE, C.; BAKERMA, H. W.; DEVRIES, T. J.; RUSHEN, J.; PAJOR, E. A. Impact of automatic milking systems on dairy cattle producers' reports of milking labour management, milk production and milk quality. **Animal**, v. *12*, n. 12, p. 2649-2656, 2018. DOI: http://doi.org/10.1017/S1751731118000654.

VAN DOOREN, H. J. C.; SPÖRNDLY, E.; WIKTORSSON, H. **Automatic milking and grazing**: applied grazing strategies. Deliverable D25, EU project "Implications of the introduction of automatic milking on dairy farms" (QLK5-2000-31006). Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2002.

VIJAYAKUMAR, M.; PARK, J. H.; KI, K. S.; LIM, D. H.; KIM, S. B; PARK, S. M.; JEONG, H. Y.; PARK, B. Y.; KIM, T. I. The effect of lactation number, stage, length, and milking frequency on milk yield in Korean Holstein dairy cows using automatic milking system. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v. *30*, n. 8, p. 1093, 2017. DOI: http://doi.org/10.5713/ajas.16.0882.

VOSMAN, J. J; POPPE, H. W. M.; MULDER, H. A.; ASSEN, A.; DUCRO, B. J.; GERRITS, A.; VESSEUR, C.; BOES, J. H.; EDING, H.; JONG, G. Automatic milking system, a source for novel phenotypes as base for new genetic selection tools. In: WORLD CONGRESS ON GENETICS APPLIED TO LIVESTOCK PRODUCTION, 2018, Auckland. **Proceedings [...]**. New Zealand: Royal Society Te Apārangi, 2018. 286 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Alula-Alemayehu-Assen/publication/325646431_AUTOMATIC_MILKING_SYSTEM_A_SOURCE_FOR_NOVEL_PHENOTYPES_AS_BASE_FOR_NEW_GENETIC_SELECTION_TOOLS/links/5c55f5d3458515a4c753919c/AUTOMATIC-MILKING-SYSTEM-A-SOURCE-FOR-NOVEL-PHENOTYPES-AS-BASE-FOR-NEW-GENETIC-SELECTION-TOOLS.pdf. Acesso em: 6 dez. 2022.

WAGNER-STORCH, A. M.; PALMER, R. W. Feeding behavior, milking behavior, and milk yields of cows milked in a parlor versus an automatic milking system. **Journal of Dairy Science**, v. *86*, n. 4, p. 1494-1502, 2003. DOI: http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73735-7.

WALKER, J.; WADDY, F.; PERRY, R.; MACGILLIVRAY, L.; ROBERTS, D.; CHRISTIE, J.; WALKER, D.; ANDERSON, D.; MACDONALD, B. **New Brunswick dairy milking system comparison guide**. New Brunswick: Milk 2020, 2014.

WEISS, D.; HELMREICH, S.; MÖSTL, E.; DZIDIC, A.; BRUCKMAIER, R. M. Coping capacity of dairy cows during the change from conventional to automatic milking. **Journal of Animal Science**, v. *82*, n. 2, p. 563-570, 2004. DOI: http://doi.org/10.2527/2004.822563x.

WOODFORD, K. B.; BRAKENRIG, M. H.; PANGBORN, M. C. New Zealand case studies of automatic-milking-systems adoption. In: NEW ZEALAND SOCIETY OF ANIMAL PRODUCTION, 2015, Lelystand, The Netherlands. **Proceedings [...]**. New Zealand: New Zealand Society of Animal Production, 2015. v. 75, p. 127-131. Disponível em: https://www.nzsap.org/system/files/proceedings/Woodford%20et%20al.%20Automatic-milking-systems%20case%20studies.pdf. Acesso em: 6 dez. 2022.

Seção 5

Sistemas Integrados

Seção Sistemas Integrados

Os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPFs) são uma estratégia sustentável para a intensificação e diversificação do uso da terra, integrando diferentes sistemas produtivos agrícolas, pecuários e florestais dentro de uma mesma área e estação de cultivo. A ILPF vem crescendo no Brasil nos últimos anos e, atualmente, estima-se que existam mais de 17 milhões de hectares cultivados com os sistemas integrados. Existem quatro possíveis modalidades de integração que são a lavoura-pecuária (ILP) ou sistema agropastoril, lavoura-floresta (ILF) ou sistema silviagrícola, floresta-pecuária (ILP) ou sistema silvipastoril e a lavoura-pecuária-floresta (ILPF) ou sistema agrossilvipastoril.

Esses sistemas permitem várias combinações de espécies de culturas anuais, culturas perenes e animais em rotação, sucessão ou consórcio, e diferentes opções de manejo, buscando otimizar a produção agropecuária e os serviços ecossistêmicos. As interações entre clima, solo, culturas e animais nos sistemas ILPF são complexas e podem ser sinérgicas ou competitivas, dependendo da adoção dos arranjos espaciais e ao longo do tempo.

O uso da agricultura e pecuária de precisão e das tecnologias digitais melhorou a compreensão da dinâmica espaço-temporal e das interações dos componentes dos sistemas integrados. A coleta, processamento e análise de dados temporais, espaciais e individuais e a combinação com o conhecimento consolidado das ciências agrárias, engenharias e informática podem apoiar as decisões de gestão considerando as variabilidades observadas. Além disso, também contribui para melhorar a gestão e a eficiência do uso de recursos e insumos, potencializando o retorno econômico e reduzindo os riscos de danos ambientais.

Nesta seção são apresentados os resultados de pesquisa sobre o uso de tecnologias digitais e de agricultura de precisão para soluções práticas aplicáveis a sistemas integrados de produção. São descritas aplicações pioneiras do uso de sensores, índices de vegetação, geoprocessamento para estimativa e mapeamento de variáveis do clima, propriedades do solo e de culturas que integram os sistemas ILPF.

Alberto Carlos de Campos Bernardi

Utilização de índices de vegetação obtidos com sensores proximais para a estimativa da biomassa e do valor nutritivo de pastagens tropicais

Use of vegetation indexes obtained with proximal sensors to estimate the biomass and nutritional value of tropical pastures

Henrique Bauab Brunetti[1], Cristiam Bosi[2], José Ricardo Macedo Pezzopane[3], Alberto Carlos de Campos Bernardi[4], Patrícia Menezes Santos[5]

[1] *Pós doutorando, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, henrique_b_brunetti@hotmail.com*
[2] *Eng. Agrônomo, UFPR, Embrapa Pecuária Sudeste, Paranavai (PR), Brasil, cristiambosi@yahoo.com.br*
[3] *Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, jose.pezzopane@embrapa.br*
[4] *Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alberto.bernardi@embrapa.br*
[5] *Pesquisadora da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, patricia.santos@embrapa.br*

RESUMO

A quantificação da massa de forragem e do valor nutritivo das pastagens é essencial para a adoção de estratégias de manejo adequadas. A quantificação dessas variáveis por método destrutivo (direto) é laboriosa e susceptível a erro devido à grande variabilidade espacial, comum em pastagens. Alternativamente, essas variáveis podem ser estimadas indiretamente por sensores proximais utilizando-se índices de vegetação, destacando-se aqueles que consideram as reflectâncias da radiação pelo dossel nos comprimentos de onda do vermelho (670 nm) e infravermelho próximo (NIR) (760 nm), como o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI), o Índice de Razão Simples (SRI) e o Índice de Razão Simples Modificado (MSR); e, na banda do 720 nm, utilizam-se o Índice de Diferença Normalizada do Vermelho Distante (NDVIRE) e o Índice de Clorofila (ChL). Para pastagens tropicais altamente produtivas, o NDVI tem mostrado saturação quando a biomassa de forragem é muito alta, enquanto o SRI, por não saturar sob essas condições, apresenta resultados melhores. Em estudos com forrageiras em parcelas, sob corte mecânico, a utilização do SRI para a estimativa de biomassa total de *Urochloa brizantha* cv. Marandu resultou em coeficiente de determinação relativamente alto, embora menor quando comparado às estimativas de massa de folha e folhas + colmo. As melhores estimativas das variáveis que consideram apenas folhas e colmos se devem à baixa correlação entre índices de vegetação e material senescente. Para a estimativa de biomassa total de *U. brizantha* cv. BRS Piatã sob pastejo, estudos concluíram que o uso de equações diferentes para estimativa de biomassa para sistemas a pleno sol e sombreados é mais apropriado. Neste caso, o SRI e o MSR foram os melhores índices para estimativa de biomassa total do pasto a pleno sol e sombreado. Boas estimativas considerando ambos os sistemas concomitantemente foram obtidas para biomassa de folha + colmo, biomassa de folha e Índice de Área Foliar (IAF). A extração de nitrogênio pelo pasto foi bem estimada pelo SRI, demonstrando potencial para uso no auxílio da adubação nitrogenada. Portanto, os índices de vegetação utilizados nestes trabalhos têm potencial para estimativa de produtividade e extração de nitrogênio de cultivares de braquiária em sistemas de produção diversos. Com o acoplamento de sensores a sistemas de posicionamento global (GPS), mapas podem ser criados e, por meio de monitoramento em tempo real, os sensores podem auxiliar produtores na tomada de decisão.

Palavras-chave: capins tropicais; método não destrutivo de estimativa de massa de forragem; estimativa de extração de nitrogênio.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000046

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

ABSTRACT
Forage mass and nutritive value quantification is essential for implementing adequate management strategies. Quantification using the destructive (direct) method is labor intensive and susceptible to errors due to the significant spatial variability common to pasturelands. Conversely, these variables can be indirectly estimated by proximal sensors using vegetation indexes, with those that consider canopy radiation reflectance at red (670 nm) and proximal infra-red (NIR) (760 nm) wavelengths standing out. These include the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Simple Ratio Index (SRI), and Modified Simple Ration Index (MSR) and at the 720 nm band the Normalized Difference Red Edge (NDVIRE) and Chlorophyll Index (ChL). For highly productive tropical pastures, the NDVI becomes saturated when biomass is very high, while the use of SRI, due to the lack of saturation in such conditions, results in better estimations. In plot studies with mechanically clipped forage grasses, the use of SRI for the *Urochloa brizantha* cv. 'Marandu' total biomass estimation resulted in relatively high coefficient of determination, although lower when compared to estimations for leaf and leaf + stem biomass. The better estimations of variables that consider only leaf and stem is due the low correlation between vegetation indexes and senescent material. For the estimation of *U. brizantha* 'BRS Piatã' total biomass under grazing conditions, studies concluded that different equations for biomass estimation in full sun and shaded pastures were needed. In such cases, the SRI and MSR were the best indexes for the total biomass estimation of full sun and shaded pastures. Good estimates considering both systems together were achieved for leaf + stem biomass, leaf biomass, and leaf area index (LAI). Pasture nitrogen extraction was effectively estimated using the SRI, showing the potential of this tool for assisting with nitrogen fertilization. Therefore, the vegetation indexes used in these studies have the potential to estimate the productivity and nitrogen extraction of Brachiaria cultivars in diverse livestock systems. By coupling the sensor with global positioning systems (GPS), maps can be drawn, and, through real time monitoring, the sensors can be used for aiding farmers in decision making.

Keywords: tropical pastures; non-destructive method for forage mass estimation; nitrogen extraction estimation.

1 INTRODUÇÃO

A quantificação da massa de forragem e de seus componentes é essencial para a determinação da capacidade de suporte, da frequência e da severidade de desfolhação de pastagens (Parsons; Penning, 1988). A mensuração da massa de forragem por método destrutivo (direto) é laboriosa e susceptível a erro devido à sua grande variabilidade espacial na área. Tal variabilidade é resultado do comportamento ingestivo dos animais, da distribuição desigual das excretas, da topografia, da variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo, entre outros fatores (Pullanagari et al., 2013), e dificulta o uso eficiente da mensuração direta de massa de forragem em grandes áreas. Nesse contexto, os métodos indiretos surgem como alternativa menos laboriosa para a estimativa de massa de forragem, além de possibilitarem a verificação da variabilidade espacial da mesma. Os métodos indiretos não são destrutivos e geralmente permitem maior número de amostragens, mas necessitam de calibração específica para espécie, características do pasto e sistema de produção. Dentre os métodos indiretos, destacam-se aqueles que consideram a reflectância de radiação dos dosséis vegetais, chamados de índices de vegetação, que podem ser obtidos por sensoriamento remoto com uso de sensores distais (satélites) (Schellberg et al., 2008; Cisneros et al., 2020) ou com o uso de sensores proximais, os quais podem ser fixos, manuais ou acoplados a tratores, maquinários ou drones (Pallottino et al., 2019).

Devido ao potencial desses métodos para auxílio na tomada de decisão em sistemas de produção animal a pasto, estes têm sido alvo de estudos por diversos grupos de pesquisa pelo mundo (Trotter et al., 2010), principalmente em pastagens temperadas (Flynn et al., 2008; Trotter et al., 2010; Barnes et al., 2015), além de alguns estudos pioneiros em pastagens tropicais (Starks et al., 2006a; Starks et al., 2006b; Zhao et al., 2007; Starks et al., 2008; Pezzopane et al., 2019; Pezzopane et al., 2022). Além de estimativas de quantidade de forragem, os sensores proximais podem ser empregados para estimativa da extração de nitrogênio (Pezzopane et al., 2022) e do valor nutritivo das gramíneas (Pullanagari et al., 2013). Nesse contexto, o acoplamento dos sensores de reflectância com sistemas de posicionamento global (GPS) pode ser utilizado para geração de mapas e monitoramento em tempo real da quantidade e da qualidade de forragem para auxílio na tomada de decisão em sistemas pecuários baseados em pastagens.

Dentre os índices de vegetação mais utilizados, se destaca o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI; Tabela 1), que considera a reflectância dos tecidos vegetais nos comprimentos de onda do vermelho (670 nm) e infravermelho próximo (NIR) (760 nm), e é utilizado para estimar produtividade (Teal et al., 2006; Amaral et al., 2015), Índice de Área Foliar (IAF;

Tabela 1. Principais índices de vegetação utilizados em estimativas de características produtivas de pastagens tropicais.

Índice	Fórmula	Referência
Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI)	$\frac{NIR_{760} - Red_{670}}{NIR_{760} + Red_{670}}$	Rouse Junior (1974)
Índice de Diferença Normalizada do Vermelho Distante (NDVI_RE)	$\frac{NIR_{760} - RE_{720}}{NIR_{760} + RE_{720}}$	Rodriguez et al. (2006)
Índice de Razão Simples (SRI)	$\frac{NIR_{760}}{Red_{670}}$	Tucker (1979)
Índice de Clorofila (ChL)	$\frac{NIR_{760}}{Red_{720}} - 1$	Gitelson et al. (2005)
Índice de Razão Simples Modificado (MSR)	$\frac{(NIR_{760} - Red_{670}) - 1}{(NIR_{760} + Red_{670})^{0,5} + 1}$	Chen (1996)

Tabela 2. Relação entre biomassa total de forragem, biomassa de folha + colmo, biomassa de folha e Índice de Área Foliar de *Urochloa brizantha* cv. Marandu e Índice de Razão Simples (SRI).

Variável*	Equação	R^2
Biomassa de forragem	y = 364,55x + 2399,9	0,73
Biomassa de folha + colmo	y = 328,22x -302,2	0,79
Biomassa de folha	y = 231,1x -550,21	0,75
Índice de área foliar	y = 0,4465x -0,9084	0,70

*Dados oriundos de capim Marandu cultivado sob diferentes regimes de irrigação (irrigado ou sequeiro) e adubação nitrogenada (0 ou 50 kg N/ha).
Adaptado de Pezzopane et al. (2022).

Cao et al., 2013) e concentração de nutrientes em plantas (Gitelson et al., 2005; Zhao et al., 2007).

Apesar de alguns bons resultados obtidos com o uso do NDVI (Teal et al., 2006; Amaral et al., 2015), a correlação entre NDVI e biomassa pode ser ruim quando há quantidade significativa de tecidos senescidos (Todd et al., 1998; Flynn et al., 2008). Além disso, a correlação entre NDVI e biomassa tem natureza assintótica e, em altas quantidades de biomassa, o NDVI satura (Gitelson et al., 2002; Mutanga; Skidmore, 2004). Nesse contexto, outros índices de vegetação baseados na reflectância dos mesmos comprimentos de onda do NDVI têm sido usados, como o Índice de Razão Simples (SRI; Tabela 1) e o Índice de Razão Simples Modificado (MSR). Adicionalmente, o índice de Diferença Normalizada do Vermelho Distante (NDVIRE) e o Índice de Clorofila (ChL) são utilizados considerando a reflectância na banda de 720 nm. Entretanto, o uso de índices de vegetação para forrageiras tropicais ainda é reduzido.

2 USO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA ESTIMATIVAS DE CARACTERÍSTICAS PRODUTIVAS EM PASTAGENS TROPICAIS

2.1 Pastagens tropicais manejadas sob corte mecânico

Em estudo com *Urochloa brizantha* cv. Marandu, Pezzopane et al. (2022), manejando o capim sob corte mecânico em diferentes condições hídricas (irrigado e sequeiro) e de adubação nitrogenada (aplicação de 0 ou 50 kg N ha^{-1} após cada corte), obtiveram resultados satisfatórios de estimativa de biomassa de forragem, biomassa de folha + colmo, IAF e biomassa de folhas, utilizando-se de índices de vegetação obtidos por sensor proximal, principalmente o SRI (Tabela 2). Quando a quantidade de biomassa é alta, o NDVI é pouco sensível a aumentos na biomassa devido à saturação desse índice, o que ocorre com menor magnitude para o índice SRI. Nesse contexto, quando há alta produção de biomassa, como no caso do capim Marandu nesse estudo (até 8000 kg MS/ha), o SRI tem melhor potencial para ser utilizado como método indireto de estimativa de produção. A saturação do NDVI se deve à maior absorção e, portanto, menor reflectância da banda do vermelho (670 nm) com o aumento da biomassa. Por outro lado, para o SRI, isso não ocorre, pois a reflectância do 760 nm é diretamente proporcional a aumentos na biomassa (Pezzopane et al., 2022). Vale ressaltar, no entanto, o potencial do uso do NDVI para pastagens menos produtivas (Paruelo et al., 1997; Li; Guo, 2010).

Os bons resultados obtidos por Pezzopane et al. (2022) refletem o uso de diferentes condições de manejo que permitem alta amplitude de produção vegetal e boa calibração das equações. Embora a performance do SRI em estimar a biomassa total de forragem tenha sido relativamente alta (R^2 = 0,73), ela foi menor quando comparada às estimativas de massa de folhas (R^2 = 0,75) e folhas + colmo (R^2 = 0,79). Esse fato ocorre devido à menor reflectância do material senescido quando comparado ao material vivo verde e foi constatado em diversos estudos com forrageiras tropicais e temperadas (Todd et al., 1998; Flynn et al., 2008; Pezzopane et al., 2019).

2.2 Sistemas de produção com pastagens tropicais sob pastejo

Em fazendas comerciais, o pasto é, em grande parte, pastejado por animais em vez de ser cortado mecanicamente. Em pastos manejados sob pastejo, ocorre

maior variabilidade espacial das suas variáveis produtivas, decorrente da seletividade animal durante o pastejo, da rejeição de certos locais por deposição de fezes e urina, da topografia, entre outros fatores (Pullanagari et al., 2013). Além disso, no Brasil e em alguns outros países, o uso de sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) tem aumentado, demandando estudos que contemplem o uso de índices de vegetação para esses sistemas.

Pezzopane et al. (2019) utilizaram os índices de vegetação para estimativa de variáveis de produção vegetal em sistemas de produção animal baseados em pastagens em sequeiro. Os sistemas eram compostos de pastos de capim Piatã (*Urochloa* (syn. *Brachiaria*) *brizantha* cv. BRS Piatã) a pleno sol e pastagens de capim Piatã sombreadas por árvores de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* clone GG100) (Figura 1). Os autores concluíram que, para a estimativa de biomassa total, o uso de equações diferentes para sistemas a pleno sol e sombreados é mais apropriado. Nesse caso, o SRI e o MSR foram os melhores índices para estimativa de biomassa total do pasto a pleno sol (R^2 = 0,53) e sombreado (R^2 = 0,48), respectivamente, com melhores performances quando comparados às estimativas que consideraram a biomassa total de ambos os sistemas juntos (Tabela 3; NDVI, R^2 = 0,30). Provavelmente, esse fa-

Figura 1. Medição de índices de vegetação em pasto de capim Piatã sombreado por árvores de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* clone GG100) (A) e a pleno sol (B) em São Carlos, SP. Detalhes do aparelho ACS-430 Crop Circle (Holland Scientific, Lincoln, NE, USA) utilizado para medição dos índices de vegetação (C e D).

Tabela 3. Relação entre biomassa total de forragem, biomassa de folha + colmo, biomassa de folha e Índice de Área Foliar de *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã cultivada a pleno sol e sombreada e índices de vegetação.

Variável	Pasto a pleno sol (SRI)		Pasto sombreado (MSR)		Todos os sistemas (NDVI)	
	Equação	R^2	Equação	R^2	Equação	R^2
Biomassa total de forragem	y = 300,18x + 5947,4	0,53	y = 448,37x + 1011,9	0,48	$y = 1097{,}7e^{1{,}6654x}$	0,30
Biomassa de folha + colmo	y = 397,06x + 756,32	0,64	y = 594,17x – 562,23	0,83	$y = 169{,}43e^{3{,}4617x}$	0,75
Biomassa de folha	y = 195,73x + 301,72	0,84	y = 384,47x – 441,82	0,83	$y = 77{,}668e^{3{,}7461x}$	0,80
Índice de área foliar	y = 0,3268x + 0,5481	0,74	y = 1,1442x – 1,5504	0,83	$y = 0{,}1321e^{4{,}2178x}$	0,81

SRI: Índice de Razão Simples; MSR: Índice de Razão Modificado; NDVI: Índice de Vegetação de Diferença Normalizada; Adaptado de Pezzopane et al. (2019).

Tabela 4. Relação entre teor de proteína bruta e o total de nitrogênio extraído pelo pasto de *Urochloa brizantha* cv. Marandu e índices de vegetação.

Variável*	Índice de vegetação	Equação	R^2
Porcentagem de proteína bruta	Índice de Clorofila (ChL)	y = 5,7934x + 5,5366	0,32
Total de nitrogênio presente na vegetação	Índice de Razão Simples (SRI)	y = 7,0837x – 16,843	0,77

*Dados oriundos de capim Marandu cultivado sob diferentes regimes de irrigação (irrigado ou sequeiro) e adubação nitrogenada (0 ou 50 kg N/ha).
Adaptado de Pezzopane et al. (2022).

to decorre de alterações estruturais que ocorrem em pastos sombreados, como menor densidade populacional de perfilhos e perfilhos mais delgados e altos (Crestani, 2015). Adicionalmente, mudanças no aparato fotossintético da folha que ocorrem como adaptação a ambientes sombreados, como menor razão clorofila a/b e menor quantidade de clorofila por unidade de área foliar (Lichtenthaler et al., 1981), causam modificações ópticas nas folhas e, consequentemente, nos índices de vegetação (Lichtenthaler et al., 1996).

Ao se considerar os sistemas a pleno sol e sombreados juntos, boas estimativas foram atingidas para as variáveis biomassa de folha + colmo (R^2 = 0,75), biomassa de folha (R^2 = 0,80) e IAF (R^2 = 0,81), uma vez que estas não consideram a porção de material morto (Tabela 3). Diversos estudos corroboram que a presença de material morto reduz a precisão dos índices de vegetação (Todd et al., 1998; Zhao et al., 2007; Flynn et al., 2008; Barnes et al., 2015). As porções de folha e colmo e de rebrota do pasto são mais importantes para a alimentação animal do que a porção de material morto na maior parte do ano e, portanto, a má precisão dos índices de vegetação para estimativa dessa última porção pouco limita seu uso nesse período. Entretanto, especificamente no período seco do ano, quando há falta de forragem de boa qualidade para alimentação animal, o material morto (seco), ainda que de má qualidade, pode ser utilizado como fonte energético-fibrosa da dieta, principalmente quando associado à suplementação proteica (Minson, 1990). Finalmente, o uso de apenas uma equação por variável para ambos os sistemas (Tabela 3) corrobora o potencial uso dessa ferramenta de forma ampla e generalista, principalmente nos períodos de baixa dependência do material morto para alimentação animal.

3 USO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO PARA ESTIMATIVA DA EXTRAÇÃO DE NITROGÊNIO E DO TEOR DE PROTEÍNA DAS PASTAGENS

Sensores proximais podem gerar estimativas em tempo real do total de N extraído pelo pasto, podendo auxiliar na quantificação do N a ser reposto no solo via adubação (Pezzopane et al., 2022), enquanto o monitoramento do teor de proteína do pasto pode auxiliar na adoção de estratégias para alimentação animal (Pullanagari et al., 2013). O teor de N na forragem consumida pelo animal tem impacto significativo em seu desempenho. Adicionalmente, quando o teor de proteína da forragem é menor que 7%, há diminuição na ingestão de matéria seca pelos animais (Silva et al., 2009) devido à falta de condições ideais para o desenvolvimento de microrganismos ruminais responsáveis pela utilização da fração energético-fibrosa da forragem (Minson, 1990).

Pezzopane et al. (2022) observaram boa relação entre o total de N presente na vegetação (N extraído pelo pasto) e o SRI (R^2 = 0,77, Tabela 4), demonstrando o potencial de índices proximais para auxílio na adubação nitrogenada. No entanto, a porcentagem de proteína bruta não foi bem correlacionada com os índices de vegetação, sendo o ChL o melhor índice para essa estimativa com R^2 de apenas 0,32 (Tabela 4), o que demonstra a necessidade de mais estudos para que sensores proximais com essas bandas espectrais possam ser utilizados para auxílio em estratégias de alimentação animal.

Alguns estudos demonstraram bons resultados com o uso de reflectância espectral para estimativa de proteína bruta e outras variáveis relacionadas ao valor nutritivo de grama-bermuda (Starks et al., 2006a; Starks et al., 2006b; Zhao et al., 2007; Starks et al., 2008). Em tais estudos, no entanto, foram utilizadas bandas diferentes daquelas disponíveis no instrumento utilizado nos estudos com braquiária (ACS-430 Crop Circle (Holland Scientific, Lincoln, NE, USA); Pezzopane et al., 2019, 2022), demonstrando o potencial de uso de instrumentos com alta amplitude espectral para determinação do valor nutritivo de gramíneas forrageiras tropicais.

4 CONCLUSÕES

Índices de vegetação calculados a partir da reflectância das bandas 670, 720 e 760 nm, medidos por sensores proximais, têm potencial para estimativa

de produtividade e extração de nitrogênio de cultivares de braquiária em sistemas de produção diversos. Dentre os índices utilizados, o SRI se mostrou o mais apropriado para estimativa de biomassa de pastagens altamente produtivas a pleno sol, enquanto o MSR se mostrou o mais apropriado para pastos sombreados. Com o acoplamento de sensores a sistemas de posicionamento global (GPS), mapas podem ser criados e, por meio de monitoramento em tempo real, as informações geradas podem auxiliar produtores na tomada de decisão. Adicionalmente, estudos com outras espécies forrageiras e outros sistemas e manejo de pastagens são necessários e desejáveis para calibração e desenvolvimento de equações específicas e adequadas para cada situação.

AGRADECIMENTOS

O estudo foi conduzido com suporte financeiro da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa – "Projeto Mata Atlântica" - 01.10.06.001.05.01), do CNPq (Grant nº 478067/20135) e da Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Grant nº 2016/02959-1). José R. M. Pezzopane agradece pelo recebimento de bolsa ao CNPq (Grant nº 308723/2015-5), Cristiam Bosi agradece pelo recebimento de bolsa à FAPESP (Grant nº 2014/11931-8) e Patrícia M. Santos agradece pelo recebimento de bolsa ao CNPq (Grant nº 311287/2020-4).

REFERÊNCIAS

AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P.; PORTZ, G.; FINAZZI, F. B.; CORTINOVE, L. Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. **Precision Agriculture**, v. 16, n. 1, p. 15-28, 2015. DOI: http://doi.org/10.1007/s11119-014-9377-2.

BARNES, P.; WILSON, B. R.; REID, N.; BAYERLEIN, L.; KOEN, T. B.; OLUPOT, G. Examining the impact of shade on above-ground biomass and normalized difference vegetation index of C3 and C4 grass species in North-Western NSW, Australia. **Grass and Forage Science**, v. 70, n. 2, p. 324-334, 2015. DOI: http://doi.org/10.1111/gfs.12118.

CAO, Q.; MIAOA, Y.; WANGA, H.; HUANGA, S.; CHENGA, S.; KHOSLAA, R.; JIANGAA, R. Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with crop circle multispectral active canopy sensor. **Field Crops Research**, v. 154, p. 133-144, 2013. DOI: http://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.08.005.

CHEN, J. M. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 22, p. 229-242, 1996. DOI: https://doi.org/10.1080/07038992.1996.10855178.

CISNEROS, A.; FIORIO, P.; MENEZES, P.; PASQUALOTTO, N.; VAN WITTENBERGHE, S.; BAYMA, G.; FURLAN NOGUEIRA, S. Mapping productivity and essential biophysical parameters of cultivated tropical grasslands from sentinel-2 imagery. **Agronomy**, v. 10, n. 5, p. 711, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/agronomy10050711.

CRESTANI, S. **Respostas morfogênicas e dinâmica da populacão de perfilhos e touceiras em Brachiaria brizantha cv Piatã submetida a regimes de sombra em área de integracão lavoura-pecuária-floresta**. 2015. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

FLYNN, S. E.; DOUGHERTY, C. T.; WENDROTH, O. Assessment of pasture biomass with the normalized difference vegetation index from active ground-based sensors. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 1, p. 114-121, 2008. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj2006.0363.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 76-87, 2002. DOI: http://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9.

GITELSON, A. A.; VIÑA, A.; CIGANDA, V.; RUNDQUIST, D. C.; ARKEBAUER, T. J. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 8, p. 2005GL022688, 2005. DOI: http://doi.org/10.1029/2005GL022688.

LI, Z.; GUO, X. A suitable vegetation index for quantifying temporal variation of leaf area index (LAI) in semiarid mixed grassland. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 6, p. 709-721, 2010. DOI: http://doi.org/10.5589/m11-002.

LICHTENTHALER, H. K.; BUSCHMANN, C.; DÖLL, M.; FIETZ, H. J.; BACH, T.; KOZEL, U.; MEIER, D.; RAHMSDORF, U. Photosynthetic activity, chloroplast ultrastructure, and leaf characteristics of high-light and low-light plants and of sun and shade leaves. **Photosynthesis Research**, v. 2, n. 2, p. 115-141, 1981. DOI: http://doi.org/10.1007/BF00028752.

LICHTENTHALER, H. K.; GITELSON, A.; LANG, M. Non-destructive determination of chlorophyll content of leaves of a green and an aurea mutant of tobacco by reflectance measurements. **Journal of Plant Physiology**, v. 148, n. 3-4, p. 483-493, 1996. DOI: http://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80283-5.

MINSON, D. **Forage in ruminant nutrition**. Queensland: Academic Press, 1990. 502 p.

MUTANGA, O.; SKIDMORE, A. K. Narrowband vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 19, p. 3999-4014, 2004. DOI: http://doi.org/10.1080/01431160310001654923.

PALLOTTINO, F.; ANTONUCCI, F.; COSTA, C.; BISAGLIA, C.; FIGORILLI, S.; MENESATTI, P. Optoelectronic proximal sensing vehicle-mounted technologies in precision agriculture: a review. **Computers and Electronics**

in Agriculture, v. 162, p. 859-873, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.034.

PARSONS, A. J.; PENNING, P. D. The effect of duration of regrowth on photosynthesis, leaf death and average rate of growth in a rotationally grazed sward. **Grass and Forage Science**, v. 43, n. 1, p. 15-27, 1988. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1988.tb02137.x.

PARUELO, J. M.; EPSTEIN, H. E.; LAUENROTH, W. K.; BURKE, I. C. Anpp estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. **Ecology**, v. 78, n. 3, p. 953-958, 1997. DOI: http://doi.org/10.1890/0012-9658(1997)078[0953:AEFNFT]2.0.CO;2.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; CRIPPA, P. H.; SANTOS, P. M.; NARDACHIONE, E. C. Assessment of Piatã palisadegrass forage mass in integrated livestock production systems using a proximal canopy reflectance sensor. **European Journal of Agronomy**, v. 103, p. 130-139, 2019. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2018.12.005.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; SENGLING, O.; BONANI, W. L.; BRUNETTI, H. B.; SANTOS, P. M. Estimating productivity and nutritive value of Marandu palisadegrass using a proximal canopy reflectance sensor. **Experimental Agriculture**, v. 58, p. e28, 2022. DOI: http://doi.org/10.1017/S0014479722000242.

PULLANAGARI, R. R.; YULE I. J.; TUOHY, M. P.; HEDLEY, M. J.; DYNES, R. A.; KING, W. M. Proximal sensing of the seasonal variability of pasture nutritive value using multispectralradiometry. **Grass and Forage Science**, v. 68, n. 1, p. 110-119, 2013. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2012.00877.x.

RODRIGUEZ, D.; FITZGERALD, G. J.; BELFORD, R.; CHRISTENSEN, L. Detection of nitrogen deficiency in wheat from spectral reflectance indices and basic crop ecophysiological concepts. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 57, n. 7, p. 781-789, 2006. DOI: http://doi.org/10.1071/AR05361.

ROUSE JUNIOR, J. W. **Monitoring the Vernal Advancement of Retrogradation of Natural Vegetation**. Greenbelt, MD, USA: NASA/GSFC, Type III Final Report, 1974, 371 p.

SCHELLBERG, J.; HILL, M. J.; GERHARDS, R.; ROTHMUND, M.; BRAUN, M. Precision agriculture on grassland: applications, perspectives and constraints. **European Journal of Agronomy**, v. 29, n. 2-3, p. 59-71, 2008. DOI: http://doi.org/10.1016/j.eja.2008.05.005.

SILVA, F. F. D.; SÁ, J. F. D.; SCHIO, A. R.; ÍTAVO, L. C. V.; SILVA, R. R.; MATEUS, R. G. Suplementação a pasto: disponibilidade e qualidade x níveis de suplementação x desempenho. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. 1, p. 371-389, 2009. DOI: http://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300037.

STARKS, P. J.; ZHAO, D., PHILLIPS; W. A.; COLEMAN, S. W. Development of canopy reflectance algorithms for real-time prediction of bermudagrass pasture biomass and nutritive values. **Crop Science**, v. 46, n. 2, p. 927-934, 2006a. DOI: https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0258.

STARKS, P. J.; ZHAO, D.; PHILLIPS, W. A.; COLEMAN, S. W. Herbage mass, nutritive value and canopy spectral reflectance of bermudagrass pastures. **Grass and Forage Science**, v. 61, n. 2, p. 101-111, 2006b. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2006.00514.x.

STARKS, P. J.; ZHAO, D.; BROWN, M. A. Estimation of nitrogen concentration and in vitro dry matter digestibility of herbage of warm-season grass pastures from canopy hyperspectral reflectance measurements. **Grass and Forage Science**, v. 63, n. 2, p. 168-178, 2008. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2007.00619.x.

TEAL, R. K.; TUBANA, B.; GIRMA, K.; FREEMAN, K. W.; ARNALL, D. B.; WALSH, O.; RAUN, W. R. In-season prediction of corn grain yield potential using normalized difference vegetation index. **Agronomy Journal**, v. 98, n. 6, p. 1488-1494, 2006. DOI: http://doi.org/10.2134/agronj2006.0103.

TODD, S. W.; HOFFER, R. M.; MILCHUNAS, D. G. Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 3, p. 427-438, 1998. DOI: http://doi.org/10.1080/014311698216071.

TROTTER, M. G.; LAMB, D. W.; DONALD, G. E.; SCHNEIDER, D. A. Evaluating an active optical sensor for quantifying and mapping green herbage mass and growth in a perennial grass pasture. **Crop & Pasture Science**, v. 61, n. 5, p. 389-398, 2010. DOI: http://doi.org/10.1071/CP10019.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979. DOI: http://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0.

ZHAO, D.; STARKS, P. J.; BROWN, M. A.; PHILLIPS, W. A.; COLEMAN, S. W. Assessment of forage biomass and quality parameters of bermudagrass using proximal sensing of pasture canopy reflectance. **Grassland Science**, v. 53, n. 1, p. 39-49, 2007. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1744-697X.2007.00072.x.

83

Variabilidade espaçotemporal da transmissão da radiação fotossinteticamente ativa em sistema silvipastoril

Spatio-temporal variability of photosynthetically active radiation transmission in a silvopastoral system

José Ricardo Macedo Pezzopane[1], Isabela Pedrino Maiello[2], Nicolle Laurenti[3], Giovana Maranhão Bettiol[4], Cristiam Bosi[5], Henrique Bauab Brunetti[6], Alexandre Rossetto Garcia[7], Alberto Carlos de Campos Bernardi[8]

[1] *Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, jose.pezzopane@embrapa.br*
[2] *Aluna de Graduação, Gestão e Análise Ambiental, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos (SP), Brasil, isabelapmaiello@gmail.com*
[3] *Aluna de Pós-Graduação, Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Araras (SP), Brasil, nicollelaurenti2@gmail.com*
[4] *Analista, Embrapa Cerrados, Planaltina (DF), Brasil, giovana.bettiol@embrapa.br*
[5] *Engenheiro Agrônomo, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Paranavaí (PR), Brasil, cristiambosi@ufpr.br*
[6] *Pós-doutorando, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, henrique_b_brunetti@hotmail.com*
[7] *Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alexandre.garcia@embrapa.br*
[8] *Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alberto.bernardi@embrapa.br*

RESUMO

Sistemas silvipastoris (SSPs), que combinam árvores com pastagens, são uma alternativa para recuperação de pastagens degradadas e para a intensificação do manejo. Nesses sistemas, o manejo das árvores é necessário para manter níveis adequados de incidência de radiação solar, associando produtividade das pastagens e conforto térmico animal. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar variabilidade espaçotemporal da transmissão da Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) em Sistema silvipastoril (SSP). O estudo foi desenvolvido na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos, SP, em um sistema silvipastoril composto de pastagem capim Piatã, arborizada com árvores de eucalipto (clone GG100), plantadas em 2011 (espaçamento de 15 m × 2 m), desbastadas em 2016 (espaçamento de 15 m × 4 m) e desbastadas novamente em 2019 (espaçamento de 30 m × 4 m). O experimento foi dividido em três fases, de acordo com a diferença de espaçamento entre as árvores: Fase 1 (2013-2016), Fase 2 (2016-2019) e Fase 3 (2019-2022). A incidência de RFA sobre a pastagem foi obtida no SSP de maneira contínua, entre 2013 e 2022, com sensores quânticos acoplados a um datalogger. No SSP, as observações foram realizadas em posições perpendiculares ao renque de árvores. As transmissões nos diferentes pontos do SSP foram obtidas pela relação entre a incidência da RFA em cada ponto do SSP. Com os dados de transmissão da RFA, foram realizadas interpolações espaçotemporais, com a técnica do vizinho mais próximo, em bases mensais comparativas para as três fases do experimento. Dessas imagens, foram obtidas estatísticas da transmissão média da RFA no período de outubro a março pela técnica estatística zonal. Os resultados evidenciaram que, no período de primavera e verão, as menores transmissões ocorreram próximo ao renque das árvores, e que, no período de outono e inverno, baixas transmissões ocorreram na maior parte do sistema, em função da orientação das linhas de árvores. Após os desbastes ocorridos em 2016 e 2019, ocorreu um aumento na transmissão de RFA no SSP, especialmente no primeiro período de primavera-verão, que foi reduzindo-se ao longo dos anos, em função da influência do crescimento das árvores no sombreamento. As médias de transmissão da RFA nos períodos de outubro a março foram de 60,8% a 45,4% na Fase 1, de 63,6% a 48,9% na Fase 2 e de 72,2% a 65,1% na Fase 3. Dessa maneira, a técnica de interpolação espaçotemporal permitiu a caracterização da transmissão da radiação fotossinteticamente ativa em sistema silvipastoril, a qual auxiliará no manejo do componente arbóreo.

Palavras-chave: interpolação; espacialização; geoprocessamento; sistema integrado; *Urochloa brizantha*; *Eucalyptus urograndis*.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000047

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

ABSTRACT

Silvopastoral systems (SSP), combining trees and pasture, are an alternative for the recovery of degraded pastures, and for improved tree management. In these systems, tree management is necessary to maintain adequate solar radiation, associating pasture productivity and animal thermal comfort. Thus, this study sought to evaluate the spatio-temporal variability of photosynthetically active radiation (RFA) transmission in a silvopastoral system (SSP). The study was carried out at Embrapa Pecuária Sudeste, in São Carlos, SP in a silvopastoral system composed of Piatã grass, shaded with eucalypt trees (GG100 clone), planted in 2011 (15 x 2 m spacing) and thinned in 2016 (15 x 4 m spacing) and 2019 (30 x 4 m spacing). The experiment was divided into three phases, according to differences in tree spacing: Phase 1 (2013-2016), Phase 2 (2016-2019), and Phase 3 (2019-2022). The PAR incidence on the pasture was obtained continuously in the SSP from 2013 to 2022, with quantum sensors coupled to a datalogger. In the SSP, the observations were carried out perpendicular to the tree rows, and the transmissions in the different points of the SSP were obtained by the relationship between the PAR incidence. With the PAR transmission data, spatio-temporal interpolations were performed monthly by nearest neighbour method, throughout the 3 experimental phases. From these images, the average PAR transmission was obtained from October to March from the zone statistics. The results showed that in spring and summer, the lowest transmissions occurred near the tree rows and in the autumn and winter, low transmissions occurred in most of the system, due to the orientation of the tree lines. After tree thinning in 2016 and 2019, there was an increase in PAR transmission in the SSP, especially in the first spring-summer period, which diminished over time due to the influence of tree growth on shading. The PAR transmission averages from October to March were 60.8% to 45.4% in Phase 1, 63.6% to 48.9% in Phase 2 and 72.2% to 65.1% in Phase 3. As such, the spatio-temporal interpolation technique allowed characterizing the photosynthetically active radiation transmission in a silvopastoral system.

Keywords: interpolation; spatialization; geoprocessing; integrated systems; *Urochloa brizantha*; *Eucalyptus urograndis*.

1 INTRODUÇÃO

Uma das alternativas para a recuperação de pastagens degradadas está relacionada com a integração das atividades pecuária, lavoura e/ou floresta na mesma área, promovendo o aumento da sustentabilidade da propriedade rural (Balbino et al., 2011). Quando os sistemas de produção combinam árvores com pastagens, chamados Sistemas silvipastoris (SSPs), ocorre variabilidade da transmissão da radiação solar pelas árvores, o que pode impactar o potencial de produção das pastagens tropicais e o conforto térmico dos animais (Pezzopane et al., 2019; Pezzopane et al., 2020).

O conhecimento dos valores de transmissão da radiação solar, assim como da sua variabilidade no sistema, pode ser mapeado e as diferentes regiões podem ser delimitadas, utilizando técnicas de geoprocessamento em uma abordagem de Agricultura de Precisão (AP). A partir desse conhecimento, podem ser estabelecidas práticas de manejo distintas nessas áreas. Outra aplicação seria relacionada ao manejo das árvores no sistema, como o desbaste, para manter níveis adequados de incidência da radiação solar e de produtividade das pastagens (Reynolds et al., 2007; Nicodemo et al., 2016).

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espaçotemporal da transmissão da Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) em Sistema silvipastoril (SSP).

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos, SP (21°57´42´´S, 47°50´28´´W, 860 m), em um sistema silvipastoril composto de pastagem de *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã, arborizada com árvores de *Eucalyptus urograndis* clone GG100, plantadas em 2011 (espaçamento de 15 m × 2 m), desbastadas em 2016 (espaçamento de 15 m × 4 m) e desbastadas novamente em 2019 (espaçamento de 30 m × 4 m).

O experimento foi conduzido no período entre 2013 e 2022, sendo dividido em três fases, de acordo com a diferença de espaçamento entre as árvores: Fase 1 (2013-2016), Fase 2 (2016-2019) e Fase 3 (2019-2022) (Figura 1). A incidência da Radiação Fotossinteticamente Ativa sobre a pastagem foi obtida no SSP, de maneira contínua, com sensores quânticos lineares (Apogee, Logan, UT, USA), acoplados a um datalogger (CR3000; Campbell Scientific, Logan, UT, USA). No SSP, as observações foram realizadas em posições perpendiculares ao renque de árvores (transectos) (Figura 2), com cinco sensores nas fases 1 e 2, e nove sensores na Fase 3. As transmissões nos diferentes pontos do SSP foram obtidas pela relação entre a incidência da RFA em cada ponto do SSP com variações entre 0% e 100%.

Com os dados de transmissão da RFA, foram realizadas interpolações espaçotemporais, em bases mensais comparativas, para as três fases do experimento. As interpolações foram realizadas com o programa Arcgis, usando-se a técnica de interpolação vizinho mais pró-

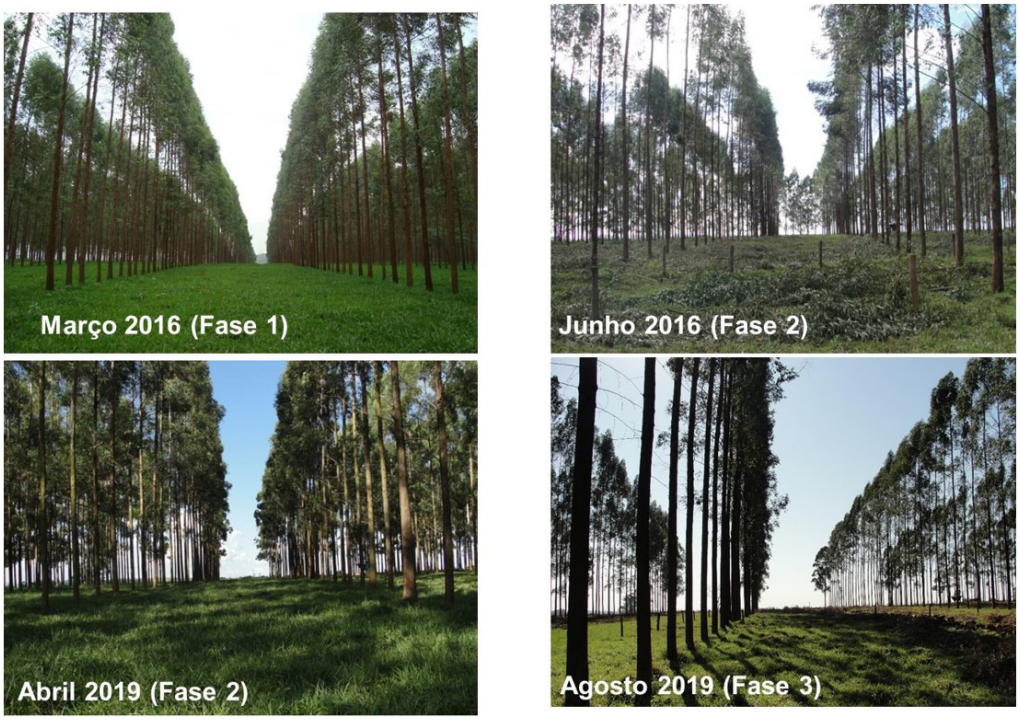


Figura 1. Fases do experimento: 1 (2013-2016), 2 (2016-2019) e 3 (2019-2022), em um Sistema silvipastoril com capim Piatã e eucaliptos, em São Carlos, SP. Fotos: J.R.M. Pezzopane.

ximo (Petri et al., 2016). A partir das imagens da transmissão da RFA no SSP, foi avaliada a transmissão média da RFA no período de outubro a março – período do ano mais significativo para o crescimento da pastagem – pela técnica estatística zonal do software Arcgis.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variabilidade espaçotemporal da transmissão da RFA durante as três fases do Sistema silvipastoril está apresentada na Figura 3. Observando-se o padrão de transmissão da RFA nas três fases, pode-se verificar que, no período de primavera e verão, as menores transmissões ocorreram próximo ao renque das árvores, ao passo que, no período de outono e inverno, baixas transmissões ocorreram na maior parte do sistema. Esse padrão foi observado em função da orientação das linhas (predominante Leste-Oeste) e do movimento aparente do sol, semelhante ao padrão observado por Bosi et al. (2020). A variabilidade espacial da incidência da radiação pode impactar os índices de conforto térmico animal (Pezzopane et al., 2019) e o potencial produtivo da pastagem (Pezzopane et al., 2020) nas diferentes posições do sistema.

Após os desbastes ocorridos em 2016 e 2019, ocorreu um aumento na transmissão de RFA nos sistemas, especialmente no primeiro período de primavera-verão. Nas fases 2 (Figura 3B) e 3 (Figura 3C), assim como já tinha ocorrido na Fase 1 (Figura 3A), foi verificada uma

Figura 2. Disposição de sensores de medição de Radiação Fotossinteticamente Ativa em um Sistema silvipastoril com capim Piatã e eucaliptos, em São Carlos, SP. Foto: J.R.M. Pezzopane.

diminuição da transmissão ao longo dos anos, em função do crescimento das árvores impactando o sombreamento. Outros autores (Schumacher; Poggiani, 1993; Silva; Maia, 2013; Karvatte Júnior et al., 2016) também obtiveram alterações na incidência de radiação associadas a características morfológicas das árvores e densidade de plantio em Sistemas silvipastoris.

As médias de transmissão da RFA nos períodos de outubro a março, obtidas por meio da estatística zonal, foram de 60,8% a 45,4% na Fase 1, de 63,6% a 48,9% na Fase 2 e de 72,2% a 65,1% na Fase 3, evidenciando o efeito do manejo das árvores no sistema, que apre-

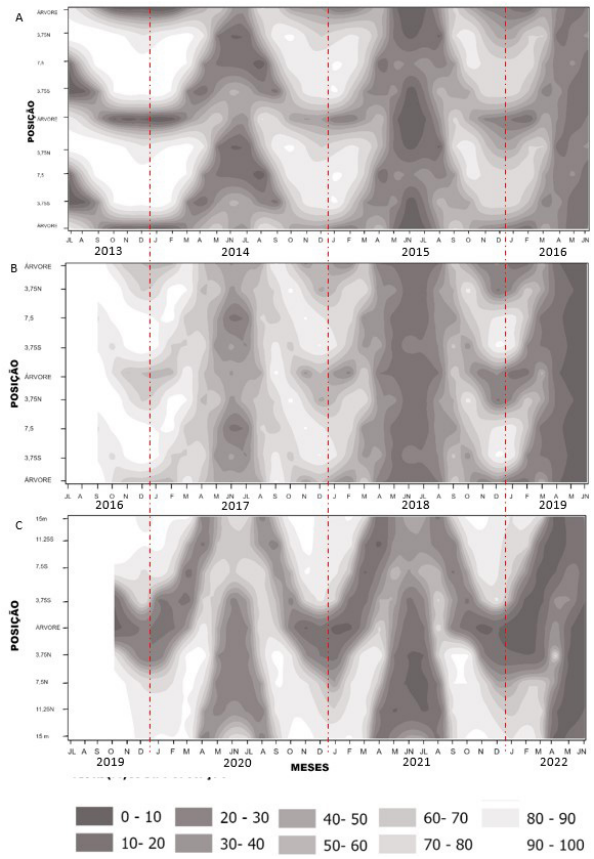


Figura 3. Variabilidade espaçotemporal da transmissão de Radiação Fotossinteticamente Ativa em um Sistema silvipastoril, durante os períodos de 2013 a 2016 (A), 2016 a 2019 (B) e 2019 a 2022 (C). Interpolação feita pelo método do vizinho mais próximo.

sentou média de transmissão na Fase 3 de 69,0%, de 56,0% na Fase 2 e de 53,3% na Fase 1.

4 CONCLUSÕES

A técnica de interpolação espaçotemporal permitiu a caracterização da transmissão da Radiação Fotossinteticamente Ativa em Sistema silvipastoril, a qual auxiliará no manejo do componente arbóreo.

AGRADECIMENTOS

Ao Projeto Rural Sustentável – Cerrado, parceria entre BID, Governo do Reino Unido, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento e IABS, pelo financiamento do projeto e pagamento de bolsa a Nicolle Laurenti e Henrique Bauab Brunetti. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processo nº 2016/02959-1), pelo financiamento parcial do projeto. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo fornecimento de bolsa a José Ricardo Macedo Pezzopane, Isabela Pedrino Maiello, Cristiam Bosi e Alberto Carlos de Campos Bernardi.

REFERÊNCIAS

BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. **Marco referencial:** integração lavoura pecuária floresta. Brasília, DF: Embrapa, 2011. 130p.

BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SENTELHAS, P. C. Silvopastoral system with Eucalyptus as a strategy for mitigating the effects of climate change on Brazilian pasturelands. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, p. 1, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/0001-3765202020180425.

KARVATTE JUNIOR, N.; KLOSOWSKI, E. S.; ALMEIDA, R. G.; MESQUITA, E. E.; OLIVEIRA, C. O.; ALVES, F. V. Shading effect on microclimate and thermal comfort indexes in integrated crop-livestock-forest systems in the Brazilian Midwest. **International Journal of Biometeorology**, v. 60, p. 1-9, 2016 DOI: https://doi.org/10.1007/s00484-016-1180-5.

NICODEMO, M. L. F.; CASTIGLIONI, P. P.; PEZZOPANE, J. R. M.; THOLON, P., CARPANEZZI, A. A. Reducing competition in agroforestry by pruning native trees. **Revista Arvore**, v. 40, p. 509-518, 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/0100-67622016000300014.

PETRI, C. A.; MAZZUCO, G. G.; BETTIOL, G. M.; BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M. Comparação de métodos de interpolação para espacialização de dados de transmissão da radiação fotossitenticamente ativa em sistema silvipastoril. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTIFICA EMBRAPA SÃO CARLOS, 8., 2016, São Carlos. **Anais...** São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2016. p. 41.

PEZZOPANE, J. R. M.; NICODEMO, M. L. F.; BOSI, C.; GARCIA, A. R.; LULU, J. Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. **Journal of Thermal Biology**, v. 79, p. 103-111, 2019.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A.C.C.; AZENHA, M. V.; OLIVEIRA, P. P. A.; BOSI, C.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N. Production and nutritive value of pastures in integrated livestock production systems: shading and management effects. **Scientia Agricola**, v. 77, p. 1-10, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0150.

REYNOLDS, P. E.; SIMPSON, J. A.; THEVATHASAN, N. V.; ANDREW, M. G. Effects of tree competition on corn and soybean photosynthesis, growth, and yield in a temperate tree-based agroforestry intercropping system in southern Ontario, Canada. **Ecological Engineering**, v. 29, p. 362-371, 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.024.

SCHUMACHER, M.V.; POGGIANI, F. Caracterização microclimática no interior dos talhões de Eucalyptus camaldulensis Dehnh, Eucalyptus grandis Hill ex Maiden e Eucalyptus torelliana F. Muell Local. em Anhembi, Sp. **Revista Ciencia Florestal**, v. 3, p. 9-20, 1993.

SILVA, R.G.; MAIA, A.S.C. The environment. In: SILVA, R.G., MAIA, A.S.C. (eds.). **Principles of Animal Biometeorology**. London: Springer, 2013. p. 1-38. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-5733-2.

84

Variabilidade espacial de atributos do solo e da vegetação em sistemas integrados de produção[1]

Spatial variability of soil and vegetation attributes in integrated production systems

Nicolle Laurenti[1], Josiane Rodrigues[2], Edilson da Silva Guimarães[3], José Ricardo Macedo Pezzopane[4], Alberto Carlos de Campos Bernardi[5]

[1] *Mestre em Agricultura e Ambiente (CCA / UFSCar), Engenheira Agrônoma, BemAgro S.A., Ribeirão Preto (SP), Brasil, nicollelaurenti2@gmail.com*

[2] *Doutora em Ciências, Professora, Centro de Ciências Agrárias (CCA), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Araras (SP), Brasil, josirodrigues@ufscar.br*

[3] *Mestre em Matemática, Estatística e Computação Aplicadas à Indústria, Supervisor do Núcleo de Tecnologia da Informação, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, edilson.guimaraes@embrapa.br*

[4] *Doutor em Física do Ambiente Agrícola, Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, jose.pezzopane@embrapa.br*

[5] *Doutor em Agronomia, Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alberto.bernardi@embrapa.br*

RESUMO

O fornecimento balanceado de nutrientes é fator-chave para a intensificação dos sistemas agropecuários e, nesse sentido, as ferramentas de agricultura de precisão podem ser utilizadas a fim de permitir a identificação de zonas homogêneas e heterogêneas em uma determinada área e, consequentemente, possibilitando definir estratégias de manejo mais eficientes. O objetivo do trabalho foi estudar a variabilidade espacial de atributos do solo e da vegetação em sistemas integrados de produção pecuária com o componente arbóreo, utilizando para isso o processo de interpolação espacial pelo Inverso da distância ponderada. O trabalho foi realizado numa área que compreende um sistema de integração pecuária-floresta (IPF) e um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos/SP. Os atributos do solo avaliados, em 2021, foram: matéria orgânica (MO), capacidade de troca catiônica (CTC), areia, argila (atributos avaliados nas profundidades 0-0,2 m e 0,2-0,4 m), resistividade elétrica (RE) (avaliada nas profundidades 0-0,5 m, 0-1,0 m e 0-2,0 m), e os atributos da vegetação foram: altura, diâmetro à altura do peito (DAP) e volume de árvores de eucalipto, sendo que os atributos da vegetação foram avaliados em abril de 2021 e abril de 2022. Os resultados indicaram que os valores dos parâmetros de fertilidade do solo foram adequados ao desenvolvimento da cultura e apresentaram baixa variabilidade espacial. As análises de solo indicaram baixa acidez, altos teores de matéria orgânica, teores médios de fósforo, potássio e capacidade de troca catiônica e altos teores de cálcio, magnésio e saturação por base. Entretanto, foram observados locais com maior variabilidade espacial para cálcio, refletindo variabilidade na capacidade de troca catiônica e saturação por base. A granulometria e a resistividade elétrica do solo apresentaram baixa variabilidade espacial na camada superficial. Mesmo sem diferenças nas propriedades do solo, houve diferença de 15% no maior volume de madeira no sistema IPF em comparação ao ILPF.

Palavras-chave: agricultura sustentável; interpolação espacial; sistemas integrados.

ABSTRACT

The balanced supply of nutrients is a critical factor for the intensification of farming systems; therefore, precision agriculture tools can be used to identify homogeneous and heterogeneous zones in each area and, consequently, enable the definition of management strategies more efficiently. This work aimed to study the spatial variability of soil and vegetation attributes in an area comprising an integrated livestock-forest (ILF) and an integrated

[1] Adaptação do trabalho: LAURENTI, N.; PEZZOPANE, J. R. M.; GUIMARAES, E. S.; BERNARDI, A. C. C.; RODRIGUES, J. Spatial variability of soil and vegetation properties in integrated production systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 10, e280481, 2024. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p3-9.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000048

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

crop-livestock-forest (ICLF) system of Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP, using the Inverse Distance Weight (IDW) interpolation. We evaluated the soil organic matter (MO), cation exchange capacity (CEC), sand, clay (attributes evaluated at depths 0-0.2 and 0.2-0.4 m), electrical resistivity (ER) (evaluated at depths 0-0.5, 0-1.0 and 0-2.0 m) and the vegetation height, diameter at breast height (DBH) and volume of eucalyptus trees (attributes evaluated in April/2021 and April/2022). The results indicated that the values for soil fertility parameters were suitable for crop development and presented low spatial variability. Soil analyses indicated low acidity, high levels of organic matter, average cation exchange capacity, phosphorus and potassium contents, high base saturation, and calcium and magnesium levels. However, locations with greater spatial variability for calcium were observed, reflecting cation exchange capacity and base saturation variability. Soil granulometry and electrical resistivity had a low spatial variability at the surface layer. Even without differences in the soil properties, there was a difference of 15% in the larger wood volume in the ILF and ICLF systems.

Keywords: sustainable agriculture; spatial interpolation; integrated systems.

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais a humanidade se depara com desafios cada vez maiores para a produção de alimentos e produtos de forma compatível com a disponibilidade de recursos naturais, e por esse motivo são grandes os apelos para que se difunda em todo o mundo o conceito de agricultura sustentável. De acordo com esse conceito, os agroecossistemas do século XXI devem ser capazes de maximizar a quantidade de produtos agrícolas de alta qualidade e conservar os recursos naturais do sistema (Balbino et al., 2012) e, nesse sentido, os sistemas integrados surgem como uma estratégia de produção sustentável (Muller et al., 2015).

Os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) caracterizam-se por agregar atividades agrícolas, pecuárias e florestais numa mesma área, e buscam efeitos de sinergia entre os componentes do agroecossistema, contemplando a preservação ambiental, a valorização do homem e a viabilidade econômica da atividade agropecuária (Balbino et al., 2012).

No que diz respeito às características do solo e da vegetação dos sistemas produtivos, de forma particular aqui os sistemas integrados, elas podem variar espacialmente dentro de um mesmo talhão até a escala regional em função de fatores intrínsecos, como os de formação do solo, e extrínsecos, como as práticas de manejo, adubação e rotação de culturas (Cambardella; Karlen, 1999). Dessa forma, a compreensão da variabilidade no espaço e tempo das propriedades edáficas e dos vegetais, nos diferentes sistemas, possui potencial para contribuir com o aumento da produtividade e qualidade, economia de insumos e redução do impacto ambiental.

Dentro desse contexto, a obtenção e o processamento de informações georreferenciadas de atributos do solo e da vegetação na área de estudo são importantes pois possibilitam, por meio de procedimento de interpolação espacial, gerar mapas relacionados aos sistemas de produção agrícola, o que constitui um aspecto de inquestionável importância, uma vez que os mapas gerados amparam tecnicamente as decisões estratégicas, permitindo observar os pontos mais complexos da área em estudo, comparando-os com o sistema de manejo adotado, seus efeitos ambientais e a produtividade das diferentes culturas (Grego et al., 2014).

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho é estudar a variabilidade espacial de atributos do solo e da vegetação numa área cultivada com um sistema de integração pecuária-floresta (IPF) e por um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), utilizando o processo de interpolação pelo inverso da distância ponderada. Com isso, pretende-se contribuir para com as tomadas de decisões que serão feitas sobre essa área, visando definir estratégias de manejo mais eficientes, em especial o uso racional de insumos e a preservação ambiental, assim também como enfatizar os benefícios dos sistemas integrados.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em uma área experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos/SP, Brasil (21°57'S, 47°51'W, 860 m de altitude). O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico com textura argilosa média (Calderano Filho et al., 1998), e o seu clima é tropical (classificação de Köppen: Cwa), com duas estações bem definidas, sendo ela seca de abril a setembro, com temperatura média de 19,9 ºC e precipitação média de 250 mm, e úmida de outubro a março, com temperatura média de 23,0 ºC e média de precipitação de 1.100 mm (Pezzopane et al., 2021).

Eucalyptus urograndis clone GG100, plantadas em 2011 (espaçamento de 15 m x 2 m), desbastadas em 2016 (espaçamento de 15 m x 4 m) e desbastadas novamente em 2019 (espaçamento de 30 m x 4 m).

A área de estudo compreende um sistema que inclui (Pezzopane et al., 2019): i) sistema de Integração pecuária-floresta (IPF) composto de pastagem de *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã, arborizada com árvores de *Eucalyptus urograndis* clone GG100, plantadas em 2011 (espaçamento de 15 m x 2 m), desbastadas em 2016 (espaçamento de 15 m x 4 m) e desbastadas novamente em 2019 (espaçamento de 30 m x 4 m); integração de lavoura-pecuária-floresta (ILPF), na mesma configuração do sistema anterior com renovação de 1/3 da área de pastagem com o plantio da cultura de milho até o ano de 2018 (Figura 1). As pastagens são manejadas em sistema rotacionado com sete dias de pastejo e 35 dias de repouso em épocas de chuvas e secas.

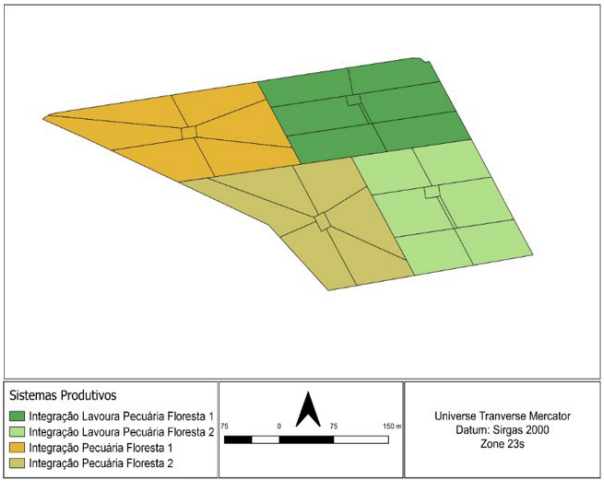


Figura 1. Área de estudo, o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF1 e ILPF2) e o sistema de integração pecuária-floresta (IPF1 e IPF2) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos/SP, Brasil.

Para a análise dos atributos do solo foi feita uma amostragem no período seco (agosto/2021) em cada piquete da área de estudo (cada piquete de 0,5 ha), totalizando 24 amostras georreferenciadas. Para isso foi utilizado o procedimento de amostragem por zonas homogêneas (Fleming et al., 2000). Neste estudo, cada piquete foi considerado uma unidade homogênea de manejo, como descrito por Bernardi et al. (2017). As amostragens em cada piquete foram realizadas em duas profundidades: 0-0,2 m e 0,2-0,4 m. Em cada piquete foram coletas seis subamostras para compor uma amostra composta georreferenciada pelo centroide do piquete (Figura 2). As variáveis analisadas na área de estudo foram: i) atributos do solo – matéria orgânica (MO), capacidade de troca catiônica (CTC), areia, argila e resistividade elétrica (RE); ii) atributos da vegetação – altura, diâmetro à altura do peito (DAP – diâmetro do tronco à altura de 1,30 m) e volume de árvores de eucalipto.

As análises dos atributos do solo foram realizadas a partir dos métodos de análise física de solos do Instituto Agronômico de Campinas (Maria et al., 2021) e a partir dos métodos de análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais do Instituto Agronômico de Campinas (Van Raij et al., 2001).

Por sua vez, as medidas de resistividade elétrica do solo foram obtidas com o sensor comercial ARP system® (Geocarta, Paris, França) (Figura 3), em três diferentes profundidades, sendo elas: 0-0,5 m, 0-1,0 m e 0-2,0 m. A coleta foi realizada em outubro de 2021, a cada 0,1 m, com velocidade aproximada de 6 m/s, sendo os dados de resistividade registrados para cada profundidade, com as respectivas coordenadas de cada ponto amostrado. No total, para cada profundi-

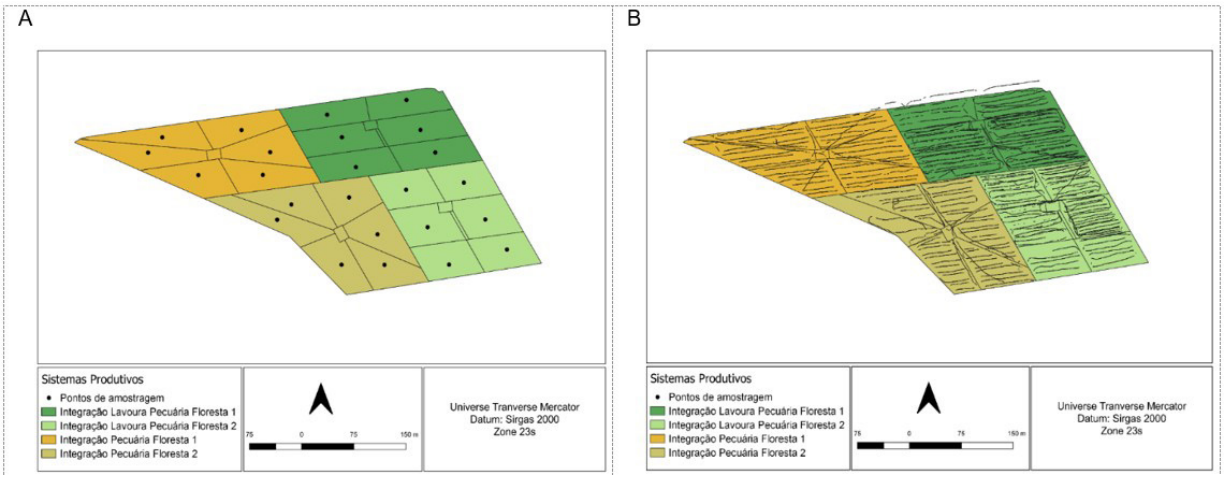


Figura 2. Pontos de amostragem para estudo de atributos (A) e para a resistividade elétrica (B) do solo em sistema de integração lavoura-pecuária floresta (ILPF) e em sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos/SP, Brasil.

Figura 3. Sensor comercial ARP system® coletando medidas de resistividade elétrica do solo.

dade, foram coletados aproximadamente 480 mil dados georreferenciados (Figura 2).

Por fim, as medições de altura e DAP dos eucaliptos foram realizadas nos meses de abril de 2021 e abril de 2022, em quinze árvores por piquete da área experimental, tendo sido utilizados os mesmos centroides considerados nas análises de solo. Os dados de altura dos eucaliptos foram obtidos utilizando-se de um hipsômetro digital Haglof®, que se baseia no princípio trigonométrico, a partir da relação entre ângulo e distância (Figura 4A), e os dados de DAP dos eucaliptos foram coletados com o auxílio de uma fita métrica (Figura 4B). O volume das árvores, por sua vez, foi obtido a partir do modelo de Schumancher-Hall (Pezzopane et al., 2021), sendo o logaritmo do volume obtido por meio do modelo lnV = - 10,2101 + 1,6808 * ln(DAP) + 1,2910 * ln(Altura).

Todos os atributos analisados foram submetidos inicialmente a uma análise exploratória. Nessa etapa, primeiramente foram identificados os *outliers* presentes nos dados e, após a retirada de tais pontos do conjunto, procedeu-se com o cálculo das seguintes medidas estatísticas: média, desvio padrão, mínimo, máximo, coeficiente de variação e as medidas de curtose e assimetria.

Finalizada a análise exploratória, seguiu-se com o processo de interpolação espacial de cada um dos atributos, utilizando-se para isso a interpolação pelo inverso da distância ponderada (*Inverse Distance Weight* – IDW) (WATSON; PHILIP, 1985). No método, a ponderação é atribuída de acordo com a distância entre o ponto no qual se quer prever a característica de interesse e os pontos amostrados. Dessa forma, pontos que estão mais distantes têm peso menor e influenciam menos na previsão, enquanto pontos que estão mais próximos têm peso maior e, portanto, têm maior influência na previsão. Esse cálculo é realizado utilizando-se da equação descrita por Mello et al. (2003):

$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{d_i^p} \times z_i\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{d_i^p}\right)},$$

em que z_p é o valor da variável a ser interpolado, z_i é o valor da variável do i-ésimo ponto amostrado, d_i corresponde à distância euclidiana entre o ponto a ser interpolado e o i-ésimo ponto amostrado, p é o valor do expoente a ser considerado no processo de interpolação, e n representa o número de pontos amostrados.

O expoente p, utilizado no processo de interpolação, atribui alguns efeitos nos resultados e, portanto, sua escolha foi realizada segundo o processo de validação cruzada, tendo por base o menor valor da raiz quadrada do erro médio (*Root Mean Square Error* – RMSE), a qual é comumente utilizada para expressar a acurácia dos resultados numéricos (Hallak; Pereira Filho, 2011).

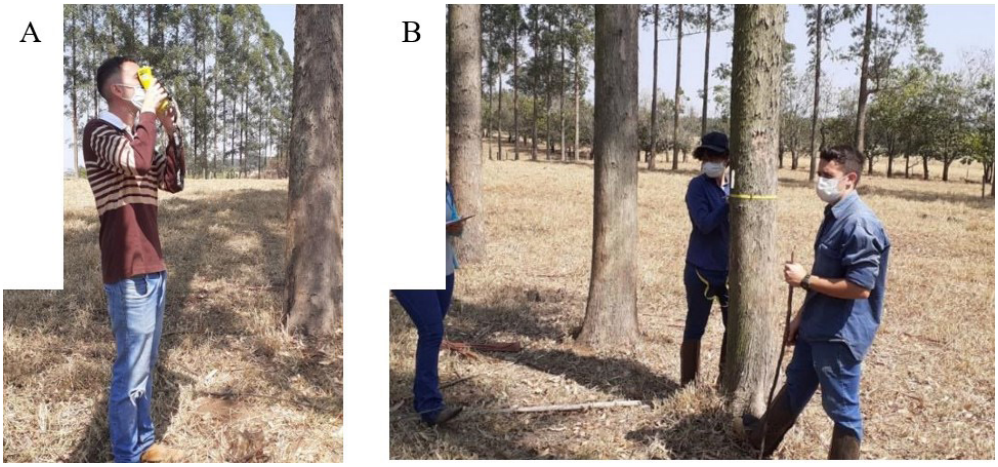


Figura 4. Medição de altura de árvore de eucalipto na área de estudo utilizando o hipsômetro (A) e do diâmetro à altura do peito (DAP) (B) de árvore de eucalipto na área de estudo.

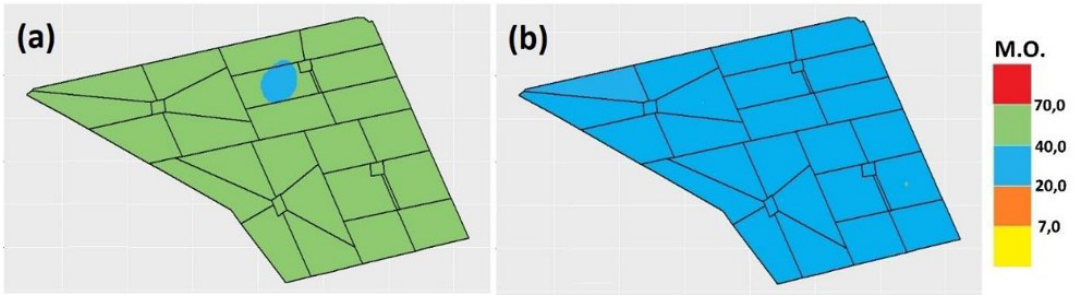


Figura 5. Variabilidade espacial de matéria orgânica (MO) (g dm^{-3}) na área de estudo. (a) Profundidade 0-0,2 m. (b) Profundidade 0,2-0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta.

Todas as análises foram desenvolvidas utilizando o software estatístico R (R Core Team, 2021).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As medidas descritivas associadas a cada um dos atributos do solo e da vegetação estão apresentadas nas Tabelas de 1 a 3. Tendo-se finalizada a análise exploratória, seguiu-se com a interpolação IDW para cada atributo. Os mapas gerados pelo processo estão apresentados nas Figuras de 6 a 11.

Analisando os mapas de MO gerados pelo processo de interpolação, observou-se que, na superfície, a menos de uma pequena região no sistema ILPF, em que os valores se enquadraram no intervalo classificado como médio, os valores obtidos para esse atributo podem ser classificados como altos. A média de MO na superfície foi igual a 48,69 g dm^{-3}, a qual se enquadra dentro da faixa considerada alta para esse parâmetro (Tabela 1). Já na subsuperfície, não houve variabilidade espacial para esse atributo, e todos os valores interpolados se classificaram dentro da faixa média (Figura 6), com uma média de MO de 31,36 g dm^{-3} (Tabela 1).

De acordo com Stockmann et al. (2013), a MO do solo apresenta em média 58% de carbono orgânico e, segundo Torres et al. (2014), a quantidade de carbono orgânico do solo está diretamente associada à quantidade de material vegetal presente no solo. Além disso, de acordo com Freitas et al. (2020), o teor de MO também é influenciado pelos resíduos de animais aportados no solo. Dessa forma, a quantidade de MO na área de estudo pode ser justificada devido a maior diversificação e produção de resíduos vegetais e animais trazidas pelos sistemas integrados. Sobre o teor de MO ser superior na superfície, isso já era esperado, uma vez que há uma deposição maior de resíduos animais e vegetais na camada superficial do solo (Freitas et al., 2020).

Sobre a CTC, através dos mapas gerados pela interpolação, pode-se dizer que a capacidade de retenção de cátions do solo na área de estudo é de média a alta, sendo que na superfície houve maior retenção de cátions que na subsuperfície, sendo que nesta última não houve variabilidade espacial do atributo (Figura 7). De modo geral, considerando os dois sistemas produtivos, obteve-se um valor médio de CTC na superfície

Tabela 1. Estatística descritiva de atributos do solo (matéria orgânica – MO (g dm^{-3}), capacidade de troca catiônica – CTC (mmolc dm^{-3}), areia (g kg^{-1}) e argila (g kg^{-1}) em sistema de integração lavoura-pecuária floresta (ILPF) e em sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos/SP, Brasil.

Medidas estatísticas	MO*	MO**	CTC*	CTC**	Areia*	Areia**	Argila*	Argila**
Média	48,69	31,36	83,77	63,00	551,00	560,42	339,70	391,58
Desvio padrão	5,71	5,08	9,81	2,87	24,37	25,31	22,66	34,63
Mínimo	37,50	25,00	64,50	58,00	492,00	504,00	297,00	308,00
Máximo	61,00	43,00	99,50	69,50	581,00	602,00	384,00	445,00
CV (%)	11,73	16,21	11,71	4,56	4,42	4,52	6,67	8,84
Curtose	2,84	2,85	2,33	2,30	3,10	2,58	2,26	2,63
Assimetria	0,29	0,70	-0,47	0,23	-0,89	-0,44	-0,17	-0,48

* Atributos avaliados na profundidade 0-0,2 m; ** Atributos avaliados na profundidade 0,2-0,4 m.

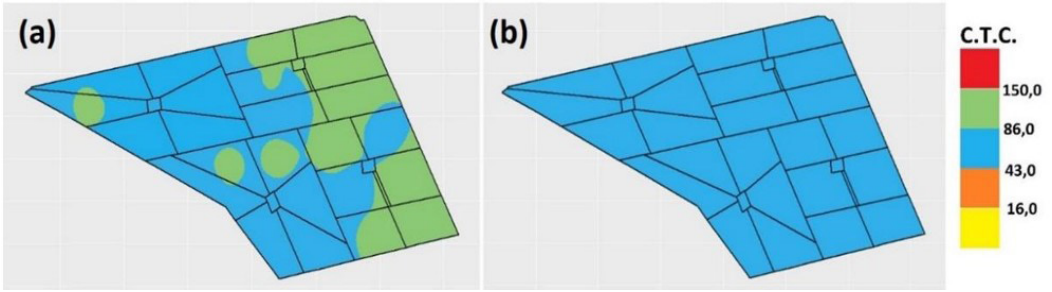


Figura 6. Variabilidade espacial da capacidade de troca catiônica (CTC) (mmolc dm^{-3}) na área de estudo. (a) Profundidade 0-0,2 m. (b) Profundidade 0,2-0,4 m. Escala de cores nos mapas: amarela – muito baixa; laranja – baixa; azul – média; verde – alta; vermelha – muito alta.

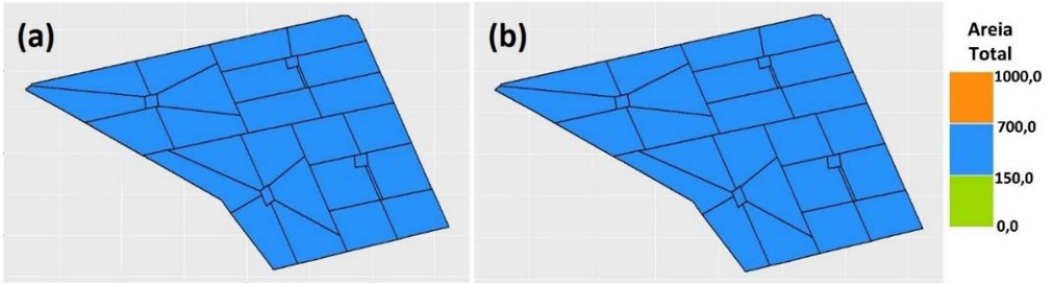


Figura 7. Variabilidade espacial da quantidade de areia (g kg^{-1}) na área de estudo. (a) Profundidade 0-0,2 m. (b) Profundidade 0,2-0,4 m.

igual a 83,77 mmolc dm^{-3} e, na subsuperfície, um valor médio igual a 63,00 mmolc dm^{-3} (Tabela 1).

Esse resultado está diretamente associado aos obtidos para o teor de MO na área. De acordo com Baldotto e Baldotto (2018), aumentos nos níveis de MO melhoram a fertilidade do solo, uma vez que promovem alterações nas suas propriedades, dentre elas a CTC. A respeito da variabilidade espacial obtida para esse atributo na superfície, verifica-se que os maiores teores de CTC foram obtidos, em sua maioria, nas áreas correspondentes ao sistema ILPF, o que se justifica pelo fato de que nesse sistema há uma maior diversificação de resíduos vegetais devido ao fato de ele integrar todos os tipos de sistemas (lavoura-pecuária-floresta).

No que diz respeito à areia, notou-se que em ambas as profundidades a quantidade de areia no solo se manteve no intervalo de 150 a 700 g kg^{-1}, com uma média de 551,00 g kg^{-1} na superfície e uma média de 560,42 g kg^{-1} na subsuperfície (Tabela 1), o que mos-

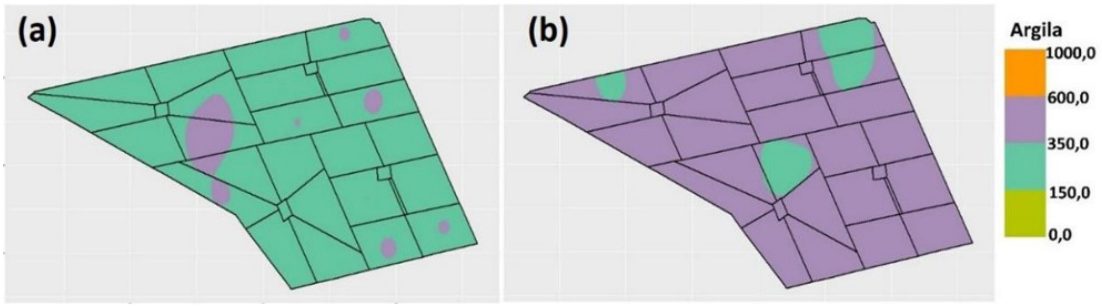


Figura 8. Variabilidade espacial da quantidade de argila (g kg^{-1}) na área de estudo. (a) Profundidade 0-0,2 m. (b) Profundidade 0,2-0,4 m.

tra que não houve variabilidade espacial do atributo na área em estudo (Figura 8), e que os valores obtidos em superfície não diferiram dos obtidos em subsuperfície. Já para a quantidade de argila, os valores obtidos na superfície foram inferiores aos obtidos na subsuperfície (Figura 9). Na profundidade 0-0,2 m, o teor de argila na maior parte da área esteve localizado no intervalo de 150 a 350 g kg^{-1}, com uma média de 339,70 g kg^{-1} e, na profundidade 0,2-0,4 m, o teor de argila esteve, na maior parte da área, no intervalo de 350 a 600 g kg^{-1}, com uma média de 391,58 g kg^{-1} (Tabela 1). De forma geral, nas duas camadas do solo não foi observada diferença significativa entre os dois sistemas produtivos.

Nos mapas gerados pela interpolação espacial para a RE do solo, é possível notar que houve aumento da resistividade com o aumento da profundidade (Figura 10). Na camada mais superficial do solo, por exemplo, notou-se uma média de resistividade de 366,79 Ω m, enquanto na camada mais profunda essa média foi de 930,00 Ω m (Tabela 2). Além disso, para esse atributo não foi observada uma diferença entre os sistemas ILPF e IPF, uma vez que a distribuição dos valores se manteve homogênea nos dois sistemas, para as três profundidades avaliadas.

Bernardi et al. (2019), ao estudarem a RE do solo em sistema agropecuário integrado, verificaram que ela diminui com o aumento da umidade, um padrão também observado por Samouëlian et al. (2005). Dessa forma, como as camadas superficiais detêm maior quantidade de água, isso impacta diretamente na menor resistividade dessa camada do solo. Os valores baixos da resistividade observados na superfície do solo em ambos os sistemas, dessa forma, podem ser justificados a uma maior umidade dessa camada do solo, o que, por sua vez, está associado à presença da vegetação nos sistemas (Fonseca et al., 2018).

Além disso, também é possível associar os valores baixos de RE na superfície do solo à valores menores de temperatura nos sistemas integrados, uma vez que temperaturas baixas provocam menor evaporação da água do solo, impactando diretamente na condutividade elétrica, diminuindo assim a sua resistividade (Santos et al., 2020). A temperatura mais amena, por sua vez, também é justificada pela presença da vegetação nos sistemas.

Por fim, as características físicas do solo não impactaram na sua resistividade. Na área de estudo, a análise física possibilitou concluir a respeito da maior quantidade de argila na subsuperfície quando comparada à superfície, o que, de acordo com Becegato e Ferreira (2005), está associado a menores valores de RE. Entretanto, na área, notou-se um aumento de resistividade com o aumento da profundidade, ou seja, maiores quantidades de argila não levaram a menores valores de resistividade, o que pode estar sendo ocasionado pela baixa umidade nessa camada do solo.

Sobre os atributos da vegetação, observando os mapas de variabilidade espacial da altura dos eucaliptos (Figura 11), verifica-se que, no ano de 2021, as árvores tinham maior altura, de forma geral, no sistema ILPF. A diferença entre esse sistema e o IPF, entretanto, não foi significativa. Considerando a área como um todo, a altura média dos eucaliptos nesse período foi de 32,77 m (Tabela 3). Já no ano de 2022, a diferença entre as alturas dos eucaliptos, nos dois sistemas, foi ainda menor, podendo-se considerar que a variável se distribuiu de maneira mais homogênea em toda a extensão dos sistemas, com uma média de altura de 34,04 m (Tabela 3).

Em relação aos dados de DAP, no ano de 2021, o comportamento da variável também ocorreu de forma relativamente homogênea em toda a área, não havendo diferença significativa entre os dois sistemas, com uma média de DAP das árvores de 33,98 cm (Tabela 3). Em 2022, entretanto, foi possível notar valores pouco menores de DAP no sistema ILPF, sendo a média de DAP dos eucaliptos para os dois sistemas integrados de 36,26 cm (Figura 11 e Tabela 3).

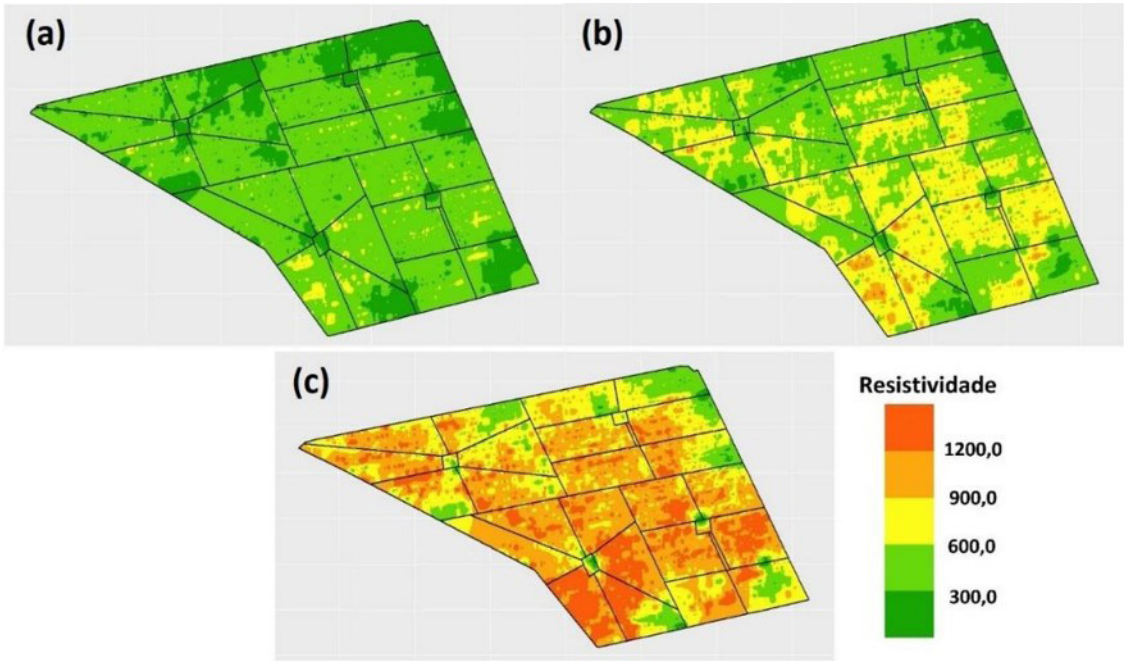


Figura 9. Variabilidade espacial da resistividade elétrica do solo (RE) (Ω m) na área de estudo. (a) Profundidade 0-0,5 m. (b) Profundidade 0-1,0 m. (c) Profundidade 0-2,0 m.

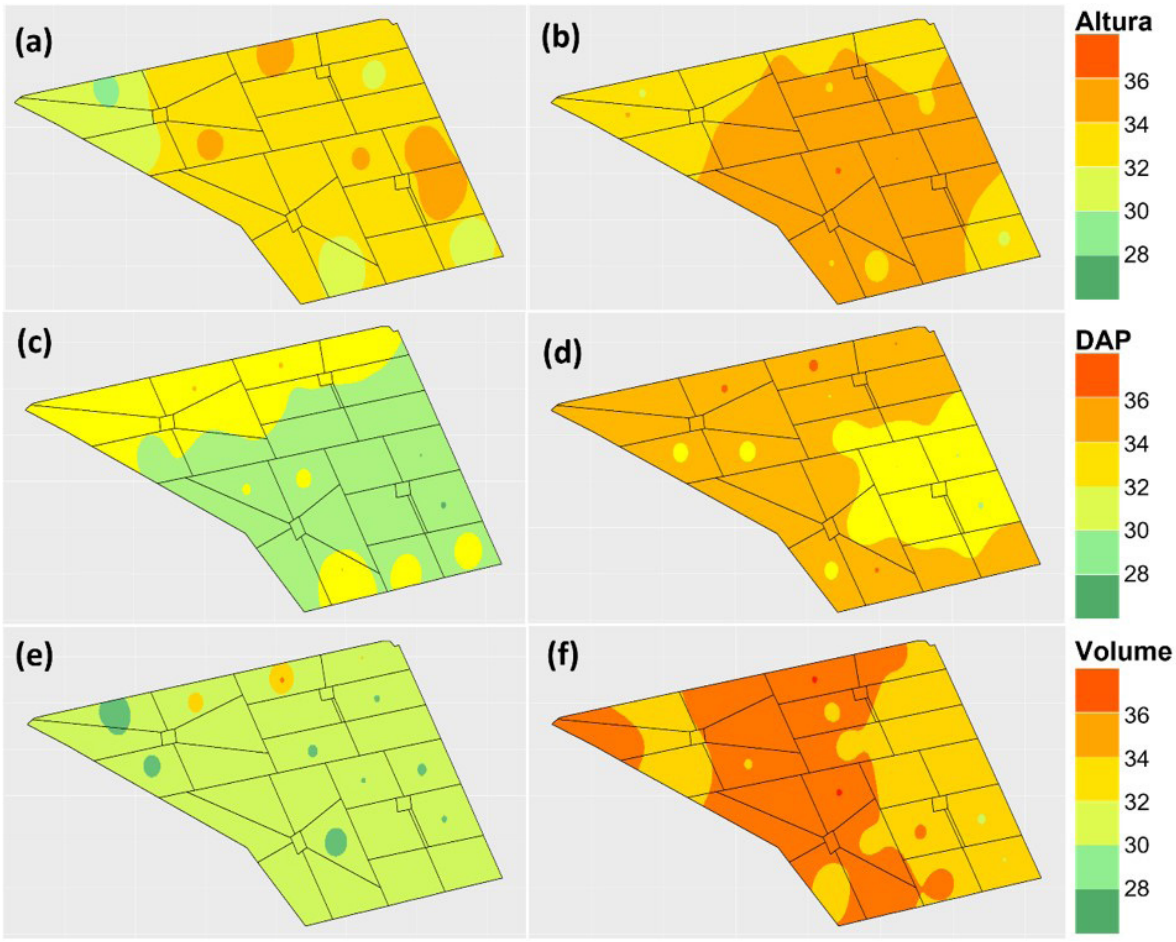


Figura 10. Variabilidade espacial da altura (m), do diâmetro à altura do peito (DAP) (cm) e do volume (m^3) de árvores de eucalipto na área de estudo. (a) Altura em abril/2021. (b) Altura em abril/2022. (c) DAP em abril/2021. (d) DAP em abril/2022. (e) Volume em abril/2021. (f) Volume em abril/2022.

Tabela 2. Estatística descritiva da resistividade elétrica do solo (RE) (Ω m) em sistema de integração lavoura-pecuária floresta (ILPF) e em sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos/SP, Brasil.

Medidas estatísticas	RE (0-0,5 m)	RE (0-1,0 m)	RE (0-2,0 m)
Média	366,79	552,95	930,00
Desvio padrão	132,08	199,80	317,01
Mínimo	9,03	18,44	96,66
Máximo	727,74	1094,09	1782,50
CV (%)	36,01	36,13	34,09
Curtose	2,75	2,76	2,77
Assimetria	0,17	0,08	0,05

Tabela 3. Estatística descritiva de atributos da vegetação (altura (m), diâmetro à altura do peito (DAP) (cm) e volume (m^3) de eucaliptos) do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e do sistema de integração pecuária-floresta (IPF) da Embrapa Pecuária Sudeste, município de São Carlos/SP, Brasil.

Medidas estatísticas	Abril/2021			Abril/2022		
	Altura	DAP	Volume	Altura	DAP	Volume
Média	32,77	33,98	1,25	34,03	36,29	1,46
Desvio padrão	1,60	1,65	0,11	1,81	1,84	0,11
Mínimo	29,20	31,00	1,10	29,70	32,90	1,24
Máximo	35,80	37,00	1,57	37,10	39,80	1,68
CV (%)	4,87	4,85	8,42	5,30	5,06	7,63
Curtose	2,69	2,30	5,32	2,88	2,26	2,51
Assimetria	-0,19	0,13	1,37	-0,49	0,03	0,09

Por fim, a partir dos mapas de variabilidade espacial dos dados de volume de eucaliptos na área de estudo (Figura 11) verificou-se que, em 2021, o volume médio das árvores foi de 1,25 m^3 (Tabela 3), não havendo diferença entre os dois sistemas produtivos. Já em 2022, o volume médio dos eucaliptos aumentou para 1,46 m^3 (Tabela 3), sendo que no IPF o volume das árvores foi pouco maior que no ILPF (Figura 11).

O *Eucalyptus urograndis* é o híbrido utilizado na área de estudo, sendo ele proveniente do cruzamento *E. grandis* x *E. urophylla* (Faria et al., 2013). É particularidade do *E. grandis* o crescimento em altura e do *E. urophylla* o crescimento em diâmetro, e essas duas qualidades juntas promovem melhorias no rendimento e uma madeira de boa qualidade (Brigatti et al., 1980). Além disso, as árvores oriundas do cruzamento dessas espécies tendem a crescer de forma mais homogênea nos dois parâmetros. O *E. urograndis* tem uma fácil adaptabilidade, e seus problemas referentes a fertilidade, compactação e acidez podem ser corrigidos através do manejo (Higa et al., 2000). Com o manejo feito na área de forma correta, o crescimento das árvores foi relativamente homogêneo, conforme já esperado.

4 CONCLUSÕES

Com relação aos atributos químicos do solo, observaram-se valores maiores de CTC no sistema ILPF, na camada superficial do solo. Na subsuperfície, entretanto, não foi observada diferença entre os sistemas produtivos. Já para a MO, foi verificada baixa variabilidade espacial, sendo que em uma pequena extensão do sistema ILPF os seus valores foram menores quando comparados ao sistema IPF. Para ambos os atributos químicos, notou-se diminuição dos valores obtidos com o aumento da profundidade.

Por sua vez, não foi observada diferença entre os sistemas com relação aos atributos quantidade de areia e quantidade de argila no solo. Notou-se, entretanto, que a argila aumentou com o aumento da profundidade, o que não ocorreu para a quantidade de areia, que se manteve a mesma nas duas camadas do solo.

Com relação à RE do solo, notou-se que ela acresceu com o aumento da profundidade, não havendo diferença significativa entre os dois sistemas produtivos.

Sobre os atributos da vegetação, verificou-se que, no ano de 2021, os maiores valores de altura de eucaliptos foram observados no sistema ILPF e, no ano de

2022, não se notou diferença entre os dois sistemas quanto a esse atributo. Já para os dados de DAP, em 2021, não houve diferença entre os sistemas produtivos e, em 2022, valores maiores de diâmetro das árvores foram observados no sistema IPF. E, por fim, sobre as medidas de volume, em 2022 os valores foram maiores que em 2021, sendo que no primeiro ano não houve diferença entre os dois sistemas produtivos e, no segundo, houve uma pequena diferença entre eles, sendo o volume das árvores pouco maior no sistema IPF. A diferença observada para os parâmetros de vegetação, entretanto, não foi significativa conforme as classes dos mapas, concluindo-se que, de modo geral, o crescimento tanto na altura, como no DAP e no volume foi relativamente homogêneo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Embrapa (Projetos Rede Pecus, Rede AP e Carne Carbono Neutro), à Fapesp (2023/02444-5 pelo suporte financeiro necessário à condução dos trabalhos experimentais. Esta pesquisa foi desenvolvida no âmbito do Projeto Rural Sustentável – Cerrado, fruto da parceria entre o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), o governo do Reino Unido, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) e a Rede ILPF e Embrapa.

REFERÊNCIAS

BALBINO, L. C.; KICHEL, A. N.; BUNGENSTAB, D. J.; ALMEIDA, R. G. Sistemas de integração: o que são, suas vantagens e limitações. In: BUNGENSTAB, D. J. (ed.). **Sistemas de integração**: a produção sustentável. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2012.

BALDOTTO, M. A.; BALDOTTO, L. E. B. Relationships between soil quality indicators, redox properties, and bioactivity of humic substances of soils under integrated farming, livestock, and forestry. **Revista Ceres**, v. *65*, n. 4, p. 373-380, 2018. DOI: http://doi.org/10.1590/0034-737x201865040010.

BECEGATO, V. A.; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. *23*, n. 4, p. 371-405, 2005. DOI: http://doi.org/10.1590/S0102-261X2005000400004.

BERNARDI, A. C. C.; PITRAT, T.; RABELLO, L. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; MAZZUCO, G. G.; BETTIO, G. M. Diferenças na tomografia da resistividade elétrica do solo devido aos níveis de água em sistema agropecuário integrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. *54*, n. e00774, 2019.

BERNARDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; MAZZUCO, G. G.; ESTEVES, S. N.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M. Spatial variability of soil fertility in an integrated crop livestock forest system. **Advances in Animal Biosciences: Precision Agriculture**, v. *8*, n. 2, p. 590-593, 2017. DOI: http://doi.org/10.1017/S2040470017001145.

BRIGATTI, R. A. M.; SILVA, A. P.; FREITAS, M. **Estudo comparativo do comportamento de alguns híbridos de Eucalyptus ssp**. IPEF: Piracicaba, 1980. (Circular Técnica, n. 123)

CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H. D. S.; FONSECA, O. O. M.; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. **Os solos da Fazenda Canchim, Centro de Pesquisa de Pecuária do Sudeste, São Carlos, SP***: levantamento semidetalhado, propriedade e potenciais. Embrapa*, CNPS: São Carlos, 1998.

CAMBARDELLA, C. A.; KARLEN, D. L. Spatial analysis of soil fertility parameters. **Precision Agriculture**, v. *1*, n. 1, p. 5-14, 1999. DOI: http://doi.org/10.1023/A:1009925919134.

FARIA, J. R.; SILVA, J. F.; NERIS, K. P.; LOPES, F. L. R.; SILVA, M. C.; LISBOA, E. S.; RODRIGUES, J.; CENTENO, A. J.; LOPES, F. M. Desenvolvimento de eucalipto urograndis no município de corumbá-GO. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, Rio Verde, v. 17, n. 2, p. 09-27, 2013.

FLEMING, K. L.; WESTFALL, D. G.; WIENS, D. W.; BRODAHL, M. C. Evaluating farmer defined management zone maps for variable rate fertilizer application. **Precision Agriculture**, v. *2*, n. 2, p. 201-215, 2000. DOI: http://doi.org/10.1023/A:1011481832064.

FONSECA, R. R.; BARBOSA, K. S. S; JESUS, K. E.; SILVA, L. M.; SOUSA, N. T. B.; SILVA, G. R.; PAULETTO, D.; OTAKE, M. Y. F. Densidade e umidade do solo em sistemas agroflorestais. **Agroecossistemas**, v. *10*, n. 2, p. 367-374, 2018. DOI: http://doi.org/10.18542/ragros.v10i2.5171.

FREITAS, I. C.; FRAZÃO, L. A.; FERREIRA, E. A.; CABRAL, C. M. Como os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta influenciam a dinâmica da matéria orgânica do solo? **Revista Vozes dos Vales**, v. 5, p. 1-13, 2020.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. In: *BERNARDI, A. C. C. et al.* **Agricultura de precisão***: resultados de um novo olhar.* Brasília, DF: Embrapa, p. 74-83, 2014.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. *26*, n. 4, p. 591-608, 2011. DOI: http://doi.org/10.1590/S0102-77862011000400009.

HIGA, R. C. V.; MORA, A. L.; HIGA, A. R. **Plantio de eucalipto na pequena propriedade rural**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 31 p.

MARIA, I. C; COELHO, R. M; ABREU, M. F.; CANTARELLA, H. **Métodos de análise física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 2021. 33 p.

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. *27*, n. 5, p. 925-933, 2003. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500017.

MULLER, M. D.; MARTINS, C. E.; BRIGHENTI, A. M.; MORENZ, M. J. F.; ROCHA, W. S. D. da; SOUZA SOBRINHO, F. de; CALSAVARA, L. H. F.; ANDRADE, P. J. M.; MACHADO, A. F. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta como alternativa para produção pecuária leiteira sustentável em áreas declivosas. In: MARTINS, P.; PICCININI, G. A.; KRUG, E. E. B.; MARTINS, C. E.; LOPES, F. C. F. *(eds.)*. **Sustentabilidade ambiental, social e econômica da cadeia produtiva do leite***: desafios e perspectivas.* Brasília, DF: Embrapa, 2015.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A.C. C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; MARCONATO, M. H.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, v. *93*, n. 1, p. 39-49, 2019. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-017-0149-7.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BERNARDI, A. C. C.; MULLER, M. D.; OLIVEIRA, P. P. A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: Productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. *312*, p. 107350, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 23 jan 2023.

SAMOUËLIAN, A.; COUSIN, I.; TABBAGH, A.; BRUAND, A.; RICHARD, G. Electrical resistivity survey in soil science: a review. **Soil & Tillage Research**, v. *83*, n. 2, p. 173-193, 2005. DOI: http://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004.

SANTOS, V. H. N.; MORBACH, M. L.; TEIXEIRA, L. P. Fatores que afetam a resistividade elétrica do solo. **Revista Tecnológica da FATEC-PR**, v. 1, n. 11, 2020.

STOCKMANN, U.; ADAMS, M. A.; CRAWFORDA, J. W.; FIELDA, D. J.; HENAKAARCHCHI, N.; JENKINS, M.; MINASNYA, B.; MCBRATNEYA, A. B.; COURCELLES, V. R.; SINGHA, K.; WHEELER, I.; ABBOTT, L.; ANGERS, D. A.; BALDOCK, J.; BIRDE, M.; BROOKES, P. C.; CHENUG, C.; JASTROWH, J. D.; LAL, R.; LEHMANNJ, J.; O'DONNELL, A. G.; PARTON, W. J.; WHITEHEAD, D.; ZIMMERMANNN, M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. *164*, p. 80-99, 2013. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001.

TORRES, C. M. M. E.; JACOVINE, L. A. G.; OLIVEIRA NETO, S. N.; BRIANEZI, D.; ALVES, E. B. B. M. Sistemas Agroflorestais no Brasil: Uma abordagem sobre a estocagem de carbono. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. *34*, n. 79, p. 235-244, 2014. DOI: http://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.79.633.

VAN RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.

WATSON, D. F.; PHILIP, G. M. A refinement of inverse distance weighted interpolation. **Geoprocessing**, v. *2*, p. 315-327, 1985.

Imagens obtidas por drone para estimativas de diâmetro e altura de árvores em sistema integrado de produção agropecuária

Images obtained by drone to estimate the diameter and height of trees in an integrated agricultural production system

José Otávio de Almeida Bueno[1], Silvio Crestana[2], Edilson da Silva Guimarães[3], José Ricardo Macedo Pezzopane[4], Vandoir Bourscheidt[5], Alberto Carlos de Campos Bernardi[6]

[1] *Doutorando, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), Brasil, tvnalmeida@gmail.com*
[2] *Pesquisador, Embrapa Instrumentação, São Carlos (SP), Brasil, silvio.crestana@embrapa.br*
[3] *Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, edilson.guimaraes@embrapa.br*
[4] *Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, jose.pezzopane@embrapa.br*
[5] *Professor, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos (SP), Brasil, vandoir@ufscar.br*
[6] *Pesquisador, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alberto.bernardi@embrapa.br*

RESUMO

Utilizar dados de sensoriamento remoto tem auxiliado a realização de inventários florestais, pois podem fornecer informações a respeito dos objetos sem que haja contato direto com eles. Porém, para realizar o planejamento das atividades de manejo florestal, é necessário ter informações confiáveis, sendo que o inventário é a base para planejar o uso dos recursos florestais. Destaca-se que as variáveis mais utilizadas para realizar inventários florestais são altura e diâmetro das árvores, e realizar a estimativa de variáveis dendrométricas sempre foi alvo de estudos que procuram encontrar técnicas novas que facilitem a obtenção dos dados para minimizar os custos com inventários. A medição dessas variáveis é fundamental para estimar o volume e a biomassa das árvores. Nesse sentido, para reduzir o tempo de trabalho em campo com coleta de dados e aumentar o número de indivíduos de eucaliptos medidos em áreas como as de sistemas de integração agropecuária, faz-se necessário o monitoramento com o uso de ferramentas derivadas das geotecnologias, tais como o geoprocessamento, que, por meio das imagens capturadas por drones, permite monitorar o crescimento das plantas e realizar análises, reduzindo assim o tempo e o custo da operação. Dessa forma, o objetivo deste estudo consistiu em verificar o potencial da nuvem tridimensional de pontos, gerada após o processamento de imagens capturadas por drone, em estimar o diâmetro na altura do peito (DAP - 1,3 metro acima do nível do solo) de árvores de eucaliptos plantadas em um sistema de integração lavoura pecuária floresta, bem como estimar altura das árvores com base nos modelos de elevação gerados. A pesquisa foi realizada em uma área da Embrapa Pecuária Sudeste, localizada no município de São Carlos, estado de São Paulo, Brasil. A aeronave remotamente pilotada utilizada para realizar os voos foi o drone Phanton 4 da DJI, os voos para aquisição do DAP foram realizados a uma altura de 2 metros acima do nível do solo e na área central entre as linhas das árvores, enquanto para aquisição de altura os voos foram realizados a uma altura de 90 metros acima do nível do solo, com sobreposições de 80% entre as fotos. As imagens foram capturadas nas bandas do visível utilizando uma câmera com foco de 3,61milímetros. Foram medidas e estimadas um total de 13 árvores para o DAP e 188 árvores para estimativa de altura. Quando correlacionados, o valor de r (coeficiente de correlação de Pearson) calculado foi de 0.62 para os valores de diâmetro medidos em campo com fita diamétrica e estimados por meio da nuvem tridimensional de pontos e de 0,58 para a estimativa de altura das árvores. Os resultados indicam a viabilidade de estimar o diâmetro na altura do peito, bem como a altura de eucaliptos no sistema de integração lavoura pecuária floresta, processando imagens das bandas RGB.

Palavras-chave: sistema integrado; ILPF; sensoriamento remoto; geoprocessamento.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000051

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

ABSTRACT
Remote sensing data has helped to carry out forest inventories by providing information about objects without direct contact with them. However, the planning of forest management activities requires reliable information, and inventory is the basis for planning the use of forest resources. It is noteworthy that the most used variables for forest inventories are the height and diameter of trees; and estimating dendrometric variables has always been the subject of studies that seek to find new techniques that facilitate data collection to minimize inventory costs. The measurement of these variables is essential to estimate the volume and biomass of the trees. Thus, to reduce fieldwork time with data collection and increase the number of eucalyptus individuals measured in areas such as agricultural integration systems, tools derived from geotechnologies, such as geoprocessing, can reduce the time and cost of the operation by using images captured by drones to monitor the growth of plants and perform analyses. This study aimed to verify the potential of the three-dimensional cloud of points, generated after processing images captured by drone, in estimating the diameter at breast height (DBH - 1.3 meters above ground level) of eucalyptus trees planted in a crop-livestock-forest integration system, as well as estimating tree heights based on the elevation models generated. The measurement of this variable is essential to estimate the volume and biomass of the trees. The research was carried out in an area of Embrapa Pecuária Sudeste, located in the municipality of São Carlos, state of São Paulo, Brazil. The remotely piloted aircraft used to carry out the flights was the DJI Phantom 4 drone, the flights were carried out at a height of 2 meters above ground level and in the central area between the tree lines, while for height acquisition, flights were performed at a height of 90 meters above ground level with 80% overlaps between photos. The images were captured in the visible bands using a camera with a focus of 3.61mm. A total of 13 trees were measured and estimated for DAP and 188 trees for height estimation. When correlated, the value of r (Pearson's correlation coefficient) calculated was 0.62 for the diameter values measured in the field with a diametric tape and estimated through the three-dimensional cloud of points and 0.58 for the estimation of tree height. The results indicate the feasibility of estimating the diameter at breast height as well as the height of eucalyptus trees in the integrated crop-livestock forestry system, by processing images of the RGB bands.

Keywords: integrated system; ILPF; remote sensing; geoprocessing.

1 INTRODUÇÃO

Os dados provenientes de técnicas de sensoriamento remoto têm sido utilizados para dar suporte aos inventários florestais, cujos resultados contribuem para estudos que abordem a temática das emissões globais de carbono e análises que envolvem biomassa madeireira (Chave et al., 2005; Zonete et al., 2010). O avanço tecnológico, bem como a redução do tamanho dos equipamentos eletrônicos, atrelado à possibilidade de se extrair informações de características de distintas imagens, têm facilitado a utilização do sensoriamento remoto para a realização dos inventários florestais (Giongo et al., 2010; Macedo, 2009).

Os sistemas integrados – como a área onde foi realizado este estudo – foram pensados e desenvolvidos com o intuito de diminuir os impactos advindos das pastagens convencionais, os quais combinam árvores, pasto e gado, e ambos são manejados de maneira integrada (Marcondelli, 2019). Sistemas como o de Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF) têm apresentado resultados significativos na melhoria da qualidade do solo, além de serem adequados para a produção de subprodutos como carvão, madeira, frutas, que contribuem para aumentar a diversidade na área e a renda para produtores rurais (Alonso, 2011; Macedo et al., 2013; Murgueitio et al., 2015).

Silva et al. (2012) relatam que sistemas que integram lavoura pecuária e floresta na mesma área são complexos, e essa combinação faz com que haja interações entre os componentes que variam tanto no tempo quanto no espaço. Essa combinação pode elevar os teores de matéria orgânica no solo, bem como contribuir para um melhor aproveitamento dos nutrientes (Balbino et al., 2011). Durante o planejamento do sistema, um dos componentes importantes são as árvores, ou seja, o item florestal, o qual pode proporcionar a produção de madeira para diversos segmentos, além de poder ser utilizado no sistema como um item importante para a conservação ambiental no Brasil (Pang et al., 2019).

Para realizar o planejamento das atividades de manejo florestal, é necessário ter informações confiáveis, e a este propósito Zonete et al. (2010) destacam que o inventário florestal é a base para planejar o uso dos recursos florestais. As variáveis mais utilizadas para realizar inventários florestais, de acordo com Freitas e Wichert (1998), são altura e diâmetro das árvores, ao passo que são aplicadas para determinar a área basal, bem como o volume de madeira existente em uma determinada área. Ademais, tendo aferido essas variáveis em campo, pode-se obter as potencialidades produtivas, utilizadas para estabelecer planos comerciais de manejo, ordenação florestal e de pesquisa (Jesus et al., 2012; Binoti et al., 2013).

Dentre os métodos automáticos por sensoriamento remoto existentes para realizar o levantamento de informações de florestas, destaca-se o LiDAR (Light Detection and Ranging), que pode adquirir informa-

ções em escalas maiores, possibilitando a aquisição de dados para inventários em intervalos de tempo reduzidos (Pereira, 2014). Essa tecnologia se baseia nos princípios utilizados por radar, porém utilizando pulsos laser de alta frequência para localizar os objetos de interesse. Esses pulsos penetram por aberturas pequenas no dossel florestal, possibilitando a aquisição de informações a respeito da estrutura da floresta e do relevo (Giongo et al., 2010).

Destaca-se também o crescente uso das aeronaves remotamente pilotadas – neste estudo chamadas de drones – em aplicações que auxiliam os inventários florestais. Esses equipamentos são veículos aéreos que variam entre pequeno e médio porte, capazes de carregar pequenas cargas, podendo ainda ser dotados de sensores como câmeras filmadoras, fotográficas e multiespectrais (Medeiros, 2007). A ampla utilização dessa tecnologia está relacionada com a facilidade de adaptação às necessidades de cada projeto, visto que as características das imagens estão associadas a parâmetros como resolução, escala e tipos de sensores, que são escolhidos de acordo com o objetivo de cada estudo (Morgan et al., 2010).

Santos et al. (2017) afirmam que realizar a estimativa de variáveis dendrométricas foi sempre alvo de estudos que procuram encontrar técnicas novas que facilitem a obtenção dos dados em via de minimizar os custos com inventários. Nesse sentido, para reduzir o tempo de trabalho em campo com coleta de dados e aumentar o número de indivíduos de eucaliptos medidos em áreas de ILPF, faz-se necessário o monitoramento com o uso de ferramentas derivadas das geotecnologias, tais como: Sistemas de Informações Geográficas (SIG), Sensoriamento Remoto (SR) e geoprocessamento, que, por meio das imagens capturadas por drones, permitem monitorar o crescimento das plantas e realizar análises, reduzindo assim o tempo e o custo da operação (Oliveira et al., 2018).

A altura de uma árvore pode ser definida como sendo a distância linear ao longo do eixo principal da planta medida do solo até ao topo (Machado; Figueiredo Filho, 2014). West (2009) define diâmetro à altura do peito (DAP) como sendo o diâmetro da seção transversal perpendicular ao eixo do tronco da árvore a 1,3 metro acima do nível do solo. A medição da altura e do DAP é fundamental para que se possa estimar o volume e a biomassa das árvores (Yoon et al., 2013). Sob esse contexto, o objetivo deste estudo consistiu em verificar o potencial da nuvem tridimensional de pontos, gerada após o processamento de imagens capturadas com o auxílio de um drone, em estimar o DAP de eucaliptos plantados em um sistema de ILPF, bem como estimar altura das árvores com base nos modelos de elevação gerados.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos, SP (21°57'42"S, 47°50'28"W, 860 m) em sistema de integração lavoura pecuária floresta composto de pastagem de *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã, arborizada com árvores de *Eucalyptus urograndis* clone GG100, plantadas em 2011 no espaçamento de 15 m x 2 m e desbastadas em 2016 para um espaçamento de 15 m x 4 m quando da realização desse estudo (Pezzopane et al., 2019a) (Figura 1). A área tem um total de 12 hectares e está dividida em 24 piquetes com a mesma quantidade de área cada (Bernardi et al., 2019; Pezzopane et al., 2019b; Bueno,

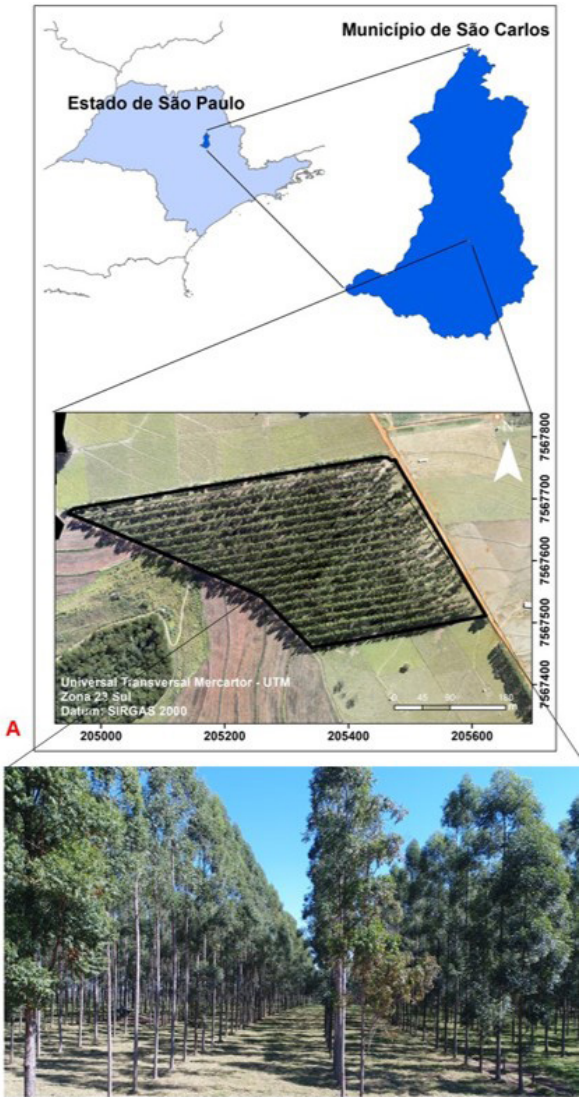


Figura 1. A – Localização geográfica da área de estudo; B – Fachada lateral entre as linhas das árvores.
Fonte: Bueno, 2021.

2021). Calderano Filho et al. (1998) destacaram o clima do local como tropical (classificação de Köppen: Cwa), sendo que de abril a setembro a estação predominante é seca com precipitação e temperatura média de 250 mm e 19,9 ºC respectivamente; já de outubro a março, a estação que predomina é úmida com precipitação e temperatura média de 1.100 mm e 23 ºC (Pezzopane et al., 2021).

A aeronave remotamente pilotada utilizada para realizar os voos foi o drone Phanton 4, da DJI, cuja autonomia de voo é de aproximadamente 27 minutos. As bandas da câmera utilizada são RGB com foco de 3,61 milímetros. As imagens para gerar as nuvens tridimensionais de pontos, que foram usadas para extrair os dados de DAP dos eucaliptos, foram capturadas entre as linhas das árvores, com voos realizados na altura de 2 (dois) metros acima do nível do solo e na área central entre as linhas das árvores do sistema integrado (Figura 1B).

As imagens foram processadas no software Open Drone Map (ODM), com base em fotogrametria e visão computacional para classificar e extrair informações 3D da nuvem tridimensional de pontos geradas (Cheng et al., 2022). Para realizar a classificação e a filtragem automática da nuvem tridimensional de pontos, os algoritmos têm como base a altura, o ângulo e as distâncias de cada ponto, com o intuito de diferenciar no terreno cada objeto, como prédios, árvores, rios, entre outros (Westoby et al., 2012).

A nuvem tridimensional de pontos georreferenciada gerada no software ODM foi exportada para o software CloudCompare em formato "las", a qual consiste em pontos que são combinados entre as sobreposições das imagens. No mesmo software, realizou-se a filtragem manual dos pontos de não interesse e dos ruídos que ficaram fora da tendência da superfície do relevo (Hung et al., 2018). Primeiro, separaram-se apenas as áreas de interesse e, na sequência, foram selecionadas apenas as linhas de árvores foco do estudo, ou seja, aquelas que apresentam as árvores que também foram mensuradas em campo com fita diamétrica. E os instrumentos mais utilizados para medir essa variável são fita diamétrica e suta dendrométrica (Magarik et al., 2020).

Em seguida, com as linhas das árvores de interesse selecionadas, deu-se início à seleção individual dos eucaliptos que foram medidos em campo. Na sequência, as árvores individuais foram segmentadas a cada 1,3 metro de altura. Na primeira altura de 1,3 metro, utilizando a ferramenta de medir distâncias entre dois pontos, mediu-se a distância entre os pontos nesse local, sendo o valor encontrado representante do DAP da árvore em questão. O DAP foi medido com base na nuvem tridimensional de pontos da Figura 3C e 3D. E foram realizadas as medições para as mesmas árvores que tiveram os valores de DAP medidos em campo com fita diamétrica

Para realizar a estimativa de altura, utilizou-se a mesma aeronave remotamente pilotada. Para esta variável, as coletas de dados foram realizadas em duas etapas. A primeira em campo utilizando um aparelho de GPS portátil para obter as coordenadas geográficas das árvores a serem medidas. Posteriormente, utilizando um hipsômetro digital (hipsômetro/clinômetro eletrônico Haglof ®), foram aferidas as alturas das árvores.

Na segunda etapa – de levantamento aéreo –, definiram-se inicialmente os planos de voo em escritório, onde se delimitou o polígono do terreno para uma área maior que a de estudo (Hung et al., 2018; Inguaggiato, 2020). A câmera durante o voo ficou posicionada para baixo/nadir e capturou imagens em cores verdadeiras (RGB) na faixa do visível (Van Iersel et al., 2018; Avtar et al., 2020; Yamaguchi et al., 2021). A sobreposição de imagens foi de 80%, tanto frontal quanto lateral (Van Iersel et al., 2018), e o voo realizado a uma altura de 90 metros, no horário entre as 11 h e 12 h.

Após o processamento das imagens aéreas capturadas para realizar a estimativa de altura, foram gerados os Modelos Digitais de Elevação (MDE), os quais foram exportados para o software QGIS, onde foi subtraído o Modelo Digital de Terreno (MDT) do Modelo Digital de Superfície (MDS), gerando assim o Modelo Digital de Altura (MDA), o qual representa os valores de altura dos objetos que estão acima do nível do solo (Pereira, 2014). No mesmo software aplicou-se uma ferramenta de reamostragem para agregar os valores dos pixels do MDA (Van Iersel et al., 2018). Na sequência, com base na localização geográfica das árvores aferidas em campo, foram extraídos os valores de altura das árvores estimadas pelo MDA. Por fim, os valores de altura estimados e aferidos em campo foram correlacionados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O percurso de voo realizado entre as linhas dos eucaliptos, a uma altura de 2 (dois) metros acima do nível do solo, com o intuito de se obter posteriormente uma nuvem tridimensional de pontos para extrair dela os valores de diâmetro, pode ser observado na Figura 2.

O voo realizado entre as linhas das árvores capturou um total de 43 imagens. A nuvem tridimensional de pontos gerada apresentou 2.253,056 pontos (Figura 3A). A nuvem tridimensional segmentada apenas para a área de interesse, ou seja, entre as linhas

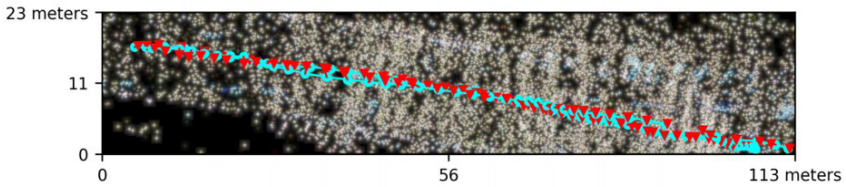


Figura 2. Percurso do voo entre as linhas das árvores. Os triângulos representam o momento em que as imagens foram capturadas.

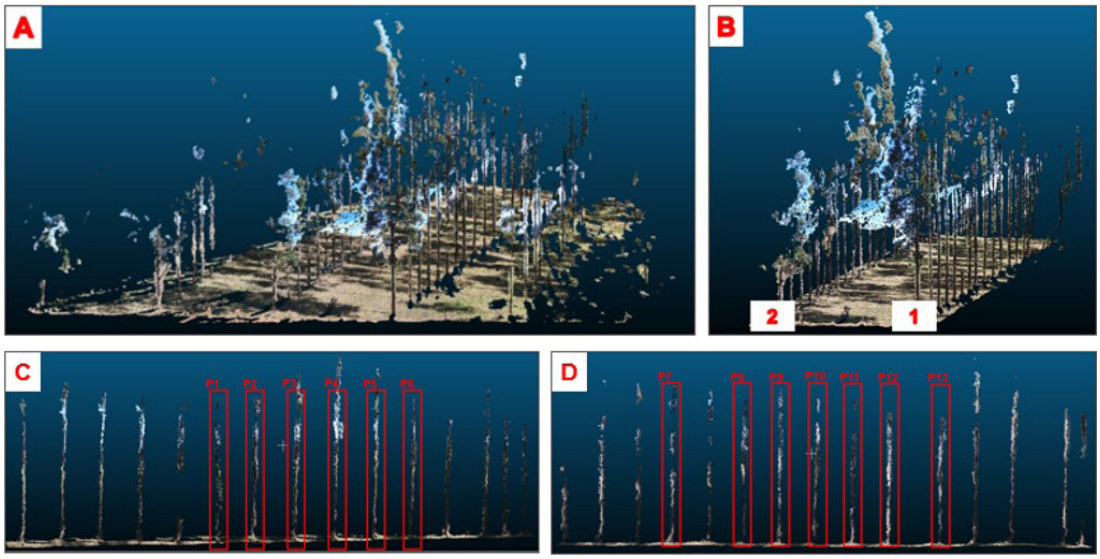


Figura 3. A – Nuvem tridimensional de pontos sem filtragem dos pontos; B – Nuvem tridimensional com filtragem dos pontos para as duas linhas de árvores; C – Nuvem tridimensional de pontos segmentada para a linha 1; D – Nuvem tridimensional de pontos segmentada para a linha 2.

das árvores, apresentou 1.310,491 pontos (Figura 3B). Na sequência, a nuvem tridimensional de pontos foi segmentada apenas para as duas linhas das árvores. A linha (1) apresentou um total de 182.827 pontos (Figura 3C). A linha (2) apresentou um total de 198.707 pontos (Figura 3D).

A Tabela 1 mostra as medidas de DAP de cada planta, bem como o número de pontos encontrados na nuvem tridimensional e as coordenadas geográficas de cada uma das árvores.

A média dos valores de DAP calculada com base nas 13 árvores estimadas e por meio da nuvem tridimensional de pontos apresentou um valor de 26.80 cm, enquanto a média dos valores aferidos em campo com fita diamétrica foi de 29.20 cm. Quando correlacionados, o valor de r (coeficiente de correlação de Pearson) calculado foi de 0.62. Observa-se que, quando comparado os valores de DAP estimados por meio da nuvem tridimensional de pontos com os medidos em campo com fita diamétrica, há uma tendência dos dados da nuvem de pontos em subestimar os valores medidos em campo.

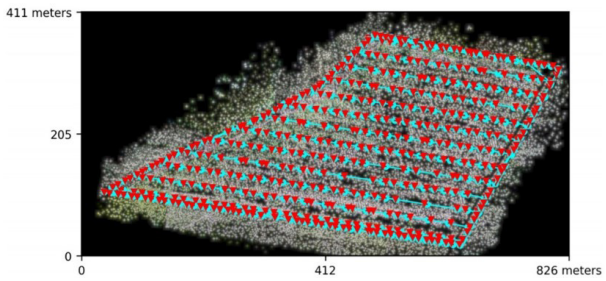


Figura 4. Percurso do voo aéreo. Os triângulos representam o momento em que as imagens foram capturadas.

Já para o voo aéreo, realizado para estimar a altura dos eucaliptos, foram capturadas 474 imagens. A nuvem tridimensional de pontos apresentou um total de 44.124,726 pontos. O percurso do voo realizado capturou imagens em 13 linhas paralelas nas regiões centrais da área de estudo, perfazendo um total de área coberta de 0,27 km^2 (Figura 4).

O MDT elaborado após o processamento das imagens capturadas com o voo realizado pelo drone apresentou valores de altitude que variam de 804 m a 824 m

Tabela 1. Valores de DAP, número de pontos e localização geográfica de cada árvore.

Planta	DAP – Nuvem de pontos (cm)	DAP – Fita diamétrica (cm)	Número de pontos	Log (X)	Lat (Y)
1	27.91	29.03	5397	-47.851401	-21.971059
2	30.76	33.06	9501	-47.851439	-21.971065
3	26.77	26.4	11594	-47.851477	-21.971071
4	26.08	29.6	13861	-47.851516	-21.971077
5	28.88	30.8	13987	-47.811554	-21.971082
6	27.37	27.1	10807	-47.851592	-21.971088
7	25.63	29.0	10988	-47.851253	-21.971178
8	27.22	31.50	12317	-47.851291	-21.971184
9	27.61	30.6	11802	-47.85133	-21.971191
10	26.64	27.90	8282	-47.851368	-21.971197
11	22.05	27.70	5791	-47.851406	-21.971203
12	27.65	28.30	12692	-47.851444	-21.971209
13	24.43	27.80	8767	-47.851482	-21.971215

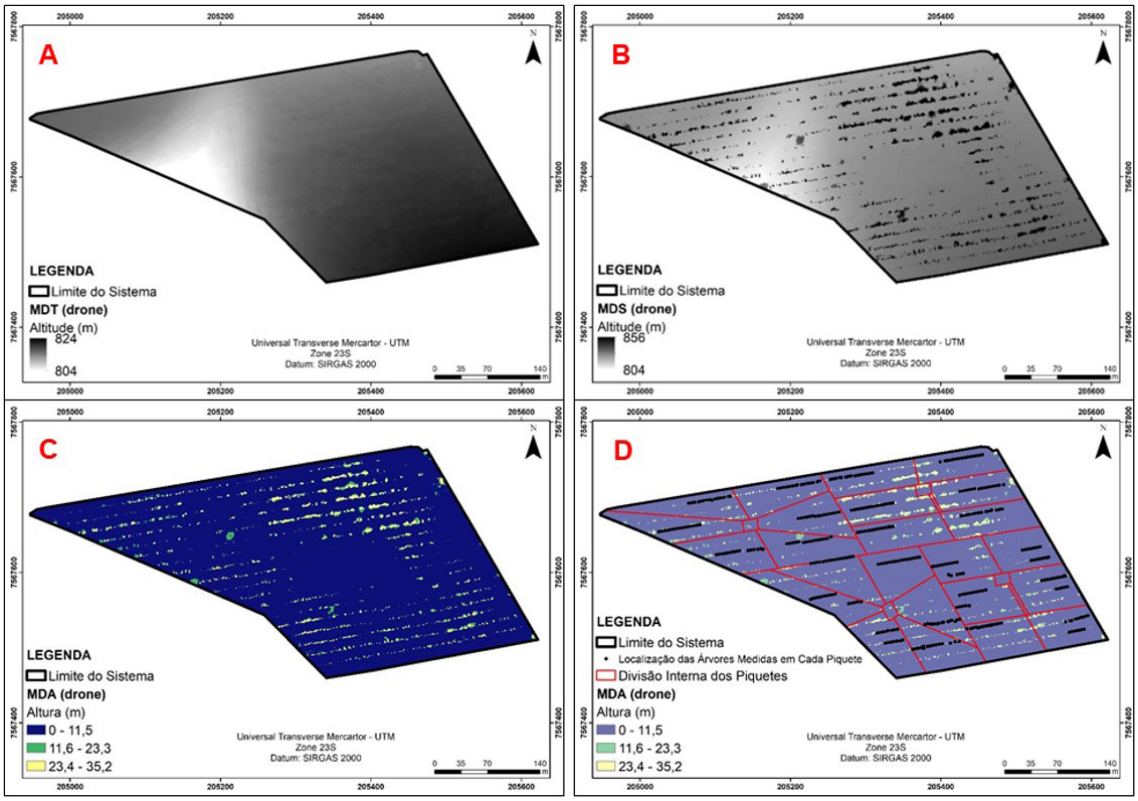


Figura 5. A – Modelo Digital de Terreno; B – Modelo Digital de Superfície; C – Modelo Digital de Altura; D – Modelo Digital de Altura com transparência na imagem, divisão interna dos piquetes e localização geográfica das árvores medidas em campo.

(Figura 5A), enquanto o MDS apresentou valores que variam de 804 m a 856 m (Figura 5B). Tendo em vista que a área do sistema integrado é composta pelo eucalipto como o componente florestal, subtraindo o MDT do MDS tem-se o MDA que representa os valores de altura das árvores (Figura 5C).Tendo como base o MDA e a localização geográfica dos eucaliptos, foram extraídos os valores das árvores estimadas, sen-

Tabela 2. Estatística descritiva dos dados de altura estimados pelo Modelo Digital de altura (MDA) e medidos em campo com hipsômetro digital.

Parâmetros Estatísticos	Hipsômetro Digital	MDA
Média	30.3	29.4
Desvio P.	2.580	1.990
Curtose	-0.556	-0.617
Assimetria	-0.442	-0.365
Mínimo	23.8	24.4
Máximo	34.7	33.4
N	188	

do que a localização geográfica de cada árvore aferida em campo, a divisão interna dos piquetes do sistema e o MDA podem ser observados na Figura 5D, destaca-se que se aplicou uma transparência na imagem para melhor visualização dos piquetes e dos pontos geográficos que representam as árvores.

Os valores das alturas das árvores extraídos do MDA foram analisados por meio das estatísticas descritivas das alturas (Tabela 2). As médias das alturas apresentaram diferença de 0,9 m. Os valores de altura obtidos em campo com hipsômetro digital apresentaram maior amplitude com relação aos estimados pelo MDA.

Nota-se que nas regiões centrais do MDS e do MDA ficaram espaços considerados vazios, ou seja, sem valor estimado. Foram extraídos valores estimados de 188 árvores, as quais foram correlacionadas com os valores das plantas medidas em campo. Quando correlacionadas, o valor do Coeficiente de Correlação de Pearson (r) entre as alturas das árvores aferidas em campo e estimadas foi de 0,58, indicando uma correlação moderada positiva entre as medidas.

4 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados indicam a viabilidade de estimar o diâmetro na altura do peito e altura dos eucaliptos no sistema de Integração Lavoura Pecuária Floresta, processando imagens verdadeiras das bandas RGB capturadas com o uso de drones. Com relação ao DAP, foi possível realizar a estimativa em função da configuração das linhas das árvores da área de estudo, que permitiu o sobrevoo do equipamento de modo a capturar imagens do tronco das árvores. Como relatado, observou-se uma tendência nos valores estimados com base nos dados das imagens processadas, tal fato pode estar associado com a correspondência entre os pontos que são considerados comuns no processamento das imagens capturadas. Desta maneira, para o aumento da acurácia da estimativa do DAP, sugere-se a realização de voos entre as linhas das árvores alternando as alturas em que são capturadas as imagens, bem como aumento do número de fotos em intervalos menores entre os disparos da câmera, havendo assim maior sobreposição entre as imagens e maior será o número de pontos correspondentes entre elas. Esse procedimento aumentará o detalhamento da nuvem tridimensional de pontos sobre a qual são extraídos os valores de DAP. Já para a variável altura, sugere-se que sejam realizados voos aéreos em pelo menos duas orientações com relação à linha das árvores – por exemplo, sul a norte e leste a oeste –, aumentando-se o número de imagens capturadas, proporcionando maior correspondência dos pontos considerados comuns entre elas, diminuindo os locais com falhas nos MDA e contribuindo para melhor correlação entre os valores estimados e medidos em campo. Para ambos os casos, o uso de pontos de controle em solo e/ou o uso de equipamentos servidos de posicionamento preciso (ex. GPS RTK) podem ajudar a melhorar os resultados observados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), à Embrapa (Projetos Rede Pecus, Rede AP e Carne Carbono Neutro), à Fapesp (Processos 15/26627-5, 16/02959-1, 19/04528-6) pelo suporte financeiro necessário à condução dos trabalhos experimentais. Esta pesquisa foi desenvolvida no âmbito do Projeto Rural Sustentável - Cerrado, fruto da parceria entre o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), o Governo do Reino Unido, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) e a Rede ILPF e Embrapa.

REFERÊNCIAS

ALONSO, J. Silvopastoral systems and their contribuition to the environment. **Canadian Journal of Agricultural Science**, v. *45*, n. 2, p. 107-114, 2011.

AVTAR, R.; SUAB, S. A.; SYUKUR, M. S.; KOROM, A.; UMARHADI, D. A.; YUNUS, A. P. Assessing the influence of UAV altitude on extracted biophysical parameters of young oil palm. **Remote Sensing**, v. *12*, n. 18, p. 3030, 2020. DOI: http://doi.org/10.3390/rs12183030.

BALBINO, L. C.; MARTINEZ, G. B.; GALERANI, P. R. **Ações de transferência de tecnologia de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta**. Platina: Embrapa Cerrados; Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2011. 52 p.

BERNARDI, A. D. C.; LAURENTI, N.; BETTIOL, G. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; ALVES, T. C.; PEDROSO, A. D. F.; ESTEVES, S. N.; PEZZOPANE, R. M. Otimização do uso de insumos em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com ferramentas de agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas**, v. *13*, n. 4, p. 290-300, 2019. DOI: http://doi.org/10.18011/bioeng2019v13n4p290-300.

BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G. Aplicação de redes neurais artificiais para estimação da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. *37*, p. 639-645, 2013. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-67622013000400007.

BUENO, J. O. A. **Estimativa de altura utilizando imagens obtidas por drone em sistema integrado de produção agropecuária**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021. DOI: http://doi.org/10.11606/D.18.2021.tde-22032023-141941.

CALDERANO FILHO, B.; DOS SANTOS, H. G.; DA FONSECA, O. O. M.; DOS SANTOS, R. D.; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. **Os solos da Fazenda Canchim, Centro de Pesquisa de Pecuária do Sudeste, São Carlos, SP***: levantamento semidetalhado, propriedade e potenciais.* São Carlos: Embrapa-CNPS, 1998.

CHAVE, J.; ANDALO, C.; BROWN, S.; CAIRNS, M. A.; CHAMBERS, J. Q.; EAMUS, D.; FÖLSTER, H.; FROMARD, F.; HIGUCHI, N.; KIRA, T.; LESCURE, J.; NELSON, B. W.; OGAWA, H.; PUIG, H.; RIÉRA, B.; YAMAKURA, T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, v. *145*, n. 1, p. 87-99, 2005. DOI: http://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x.

CHENG, M. L.; MATSUOKA, M.; LIU, W.; YAMAZAKI, F. Near-real-time gradually expanding 3D land surface reconstruction in disaster areas by sequential drone imagery. **Automation in Construction**, v. *135*, p. 104105, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104105.

FREITAS, A. G.; WICHERT, M. C. P. **Comparação entre instrumentos tradicionais de medição de diâmetro e altura com o Criterion 400**. Piracicaba: IPEF, 1998. (Circular técnica nº188).

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; AMARAL MACHADO, S.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. *30*, n. 63, p. 231-244, 2010. DOI: http://doi.org/10.4336/2010.pfb.30.63.231.

HUNG, M. N. W. B.; MOREIRA SAMPAIO, T. V.; SCHULTZ, G. B.; CROVADOR SIEFERT, C. A.; LANGE, D. R.; SYRING MARANGON, F. H.; Santos, I. Levantamento com veículo aéreo não tripulado para geração de modelo digital do terreno em bacia experimental com vegetação florestal esparsa. **RAEGA: O Espaço Geográfico em Análise**, v. *43*, p. 215-231, 2018. DOI: http://doi.org/10.5380/raega.v43i0.56621.

INGUAGGIATO, F. F. **Utilização das aeronaves remotamente pilotadas como ferramenta de análise da pós-ocupação de uso do solo**: o estudo de caso do Shopping Passeio, São Carlos (SP) e seu estudo de impacto de vizinhança. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

JESUS, C. M. D.; MIGUEL, E. P.; LEAL, F. A.; IMAÑA ENCINAS, J. Avaliação de diferentes hipsômetros para medição da altura total em um povoamento clonal de Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis. **Enciclopédia Biosfera**, v. *8*, n. 15, p. 291-299, 2012.

MACEDO, M .C. M.; ZIMMER, A. H.; KICHEL, A. N.; ALMEIDA, R. G.; ARAÚJO, A. R. Degradação de pastagens, alternativas de recuperação e renovação, e formas de mitigação. In: ENCONTRO DE ADUBAÇÃO DE PASTAGENS DA SCOT CONSULTORIA, 2013, Ribeirão Preto. **Anais** [...]. Bebedouro: Scot Consultoria, 2013. p. 158-181.

MACEDO, R. C. **Estimativa volumétrica de povoamento clonal de *Eucalyptus sp*. através de laser scanner aerotransportado**. 2009. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 3. ed. Guarapuava: Unicentro, 2014. 316 p.

MAGARIK, Y. A.; ROMAN, L. A.; HENNING, J. G. How should we measure the DBH of multi-stemmed urban trees? **Urban Forestry & Urban Greening**, v. *47*, p. 126481, 2020. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126481.

MARCONDELLI, A. C. B. **Comparação de ciclagem de nutrientes em pastagens convencionais, sistemas silvipastoris e floresta estacional semidecídua**. 2019. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

MEDEIROS, F. A. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em agricultura de precisão**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

MORGAN, J. L.; GERGEL, S. E.; COOPS, N. C. Aerial photography: a rapidly evolving tool for ecological management. **BioScience**, v. *60*, n. 1, p. 47-59, 2010. DOI: http://doi.org/10.1525/bio.2010.60.1.9.

MURGUEITIO, E.; BARAHONA, R.; CHARÁ, J. D.; FLORES, M. X.; MAURICIO, R. M.; MOLINA, J. J.The intensive silvopastoral systems in Latin America sustainable alternative to face climatic change in animal husbandry. **Canadian Journal of Agricultural Science**, v. *49*, n. 4, p. 551-554, 2015.

OLIVEIRA, O. A.; TEIXEIRA, T. M. A.; PASSO, D. P. Mapeamento dos conflitos de uso da terra em áreas de preservação permanentedos rios que contribuempara o barramento do rio paranã, Formosa-GO. **Boletim Goiano de Geografia**,

v. 38, n. 3, p. 491-515, 2018. DOI: http://doi.org/10.5216/bgg.v38i3.56348.

PANG, K.; VAN SAMBEEK, J. W.; NAVARRETE, T. Responses of legumes and grasses to non-moderate, and dense shade in Missouri, USA. I. Forage yeld and its species-level plasticity. **Agroforestry Systems**, v. *93*, p. 25-38, 2019. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-017-0068-7.

PEREIRA, J. P. **Mensuração automática de copas de *Araucaria augustifolia* (Bertol.) Kuntze a partir de dados LiDAR para estimativa de variáveis dendrométricas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; MARCONATO, M. H.; FARIA PEDROSO, A.; ESTEVES, S. N. Forage productivity, and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, v. *93*, n. 1, p. 39-49, 2019b. DOI: http://doi.org/10.1007/s10457-017-0149-7.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; CAMPOS BERNARDI, A. C.; MULLER, M. D.; OLIVEIRA, P. P. A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. *312*, p. 107350, 2021. DOI: http://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350.

PEZZOPANE, J. R. M.; NICODEMO, M. L. F.; BOSI, C.; GARCIA, A. R.; LULU, J., Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. **Journal of Thermal Biology**, v. *79*, p. 103-111, 2019a. DOI: http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015.

SANTOS, T. T.; BASSOI, L. H.; OLDONI, H.; MARTINS, R. L. Automatic grape bunch detection in vineyards based on affordable 3D phenotyping using a consumer webcam. In: BARBEDO, J. G. A. (ed.). CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 11., 2017, Campinas. **Anais** [...]. Brasília: Embrapa, 2017. p. 89-98.

SILVA, G. F. D.; CURTO, R. D. A.; SOARES, C. P. B.; PIASSI, L. D. C. Avaliação de métodos de edição de altura em florestas naturais. **Revista Árvore**, v. *36*, n. 2, p. 341-348, 2012. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-67622012000200015.

VAN IERSEL, W.; STRAATSMA, M.; ADDINK, E.; MIDDELKOOP, H. Monitoring height and greenness of non-woody floodplain vegetation with UAV time series. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. *141*, p. 112-123, 2018. DOI: http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.04.011.

WEST, P. **Tree and forest measurement**. Cham: Springer Science & Business Media, 2009. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-540-95966-3.

WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience application. **Geomorphology**, v. *179*, p. 300-314, 2012. DOI: http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021.

YAMAGUCHI, T.; TANAKA, Y.; IMACHI, Y.; YAMASHITA, M.; KATSURA, K. Feasibility of combining deep learning and RGB images obtained by unmanned aerial vehicle for leaf area index estimation in rice. **Remote Sensing**, v. *13*, n. 1, p. 84, 2021. DOI: http://doi.org/10.3390/rs13010084.

YOON, T. K.; PARK, C. W.; LEE, S. J.; KO, S.; KIM, K. N.; SON, Y.; LEE, K. H.; OH, S.; LEE, W.; SON, Y. Allometric equations for estimating the aboveground volume of five common urban street tree species in Daegu, Korea. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. *12*, n. 3, p. 344-349, 2013. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.03.006.

ZONETE, M. F.; RODRIGUEZ, L. C. E.; PACKALEN, P. Estimação de parâmetros biométricos de plantios clonais de eucalipto no sul da Bahia: uma aplicação da tecnologia laser aerotransportada. **Scientia Forestalis**, v. *38*, n. 86, p. 225-235, 2010.

86

Monitoramento em alta frequência do índice de vegetação de sistema integrado Lavoura-Pecuária

High frequency monitoring of vegetation index in an integrated crop-livestock system

Marcos Corrêa Neves[1], Alfredo José Barreto Luiz[2], Naylor Bastiani Perez[3]

[1] *Pesquisador, Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna (SP), Brasil, marcos.neves@embrapa.br*
[2] *Pesquisador, Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna (SP), Brasil, alfredo.luiz@embrapa.br*
[3] *Pesquisador, Embrapa Pecuária Sul, Bagé (RS), Brasil, naylor.perez@embrapa.br*

RESUMO

A presença frequente de nuvens restringe o monitoramento sistemático com dados orbitais dos sistemas agrícolas. A missão Sentinel-2, com seus dois satélites, combina alta resolução espacial (10 m) com uma taxa de revisita de 5 dias, chegando a 2 ou 3 dias em latitudes médias. Uma resolução temporal pequena é importante para aumentar a oferta de dados e minorar o problema da ocorrência de nuvens. Este trabalho apresenta o processo de seleção e processamento dos dados orbitais do Sentinel-2 e os resultados do monitoramento de um sistema Integração Lavoura-Pecuária por dois ciclos completos. Foram selecionadas 72 passagens e gerados mapas NDVI para cada passagem. A média dos índices de cada passagem foi utilizada como medida do vigor da vegetação em diferentes estágios do sistema, e o seu o desvio-padrão, como indicativo da variabilidade espacial. Os resultados demonstram que as constelações de satélites têm grande potencialidade para o acompanhamento dos sistemas agrícolas em alta frequência.

Palavras-chave: índice de vegetação; integração lavoura-pecuária; Sentinel-2.

ABSTRACT

The frequent presence of clouds restricts the systematic monitoring of agricultural systems with orbital data. The Sentinel-2 mission with its two satellites combines a high spatial resolution (10m) with a 5-day or 2/3-day revisit rate in mid-latitudes regions. A small temporal resolution is important to increase the data supply and reduce the problem of cloud occurrence. This paper presents the process of selection and processing of Sentinel-2 orbital data and the results of monitoring a Crop-Livestock Integration system for two complete cycles. Seventy-two cloudless images were selected and corresponding NDVI maps were generated. The indices average of each passage was used as measure of the vigor of the vegetation in different system stages and standard deviation as an indication of the spatial variability. The results demonstrate that systems with multiple satellites have great agricultural monitoring potential at high frequency.

Keywords: vegetation index; integrated crop-livestock; Sentinel-2.

1 INTRODUÇÃO

Os dados orbitais têm grande aplicabilidade na agricultura, sendo os índices de vegetação, em especial, muito úteis para caracterizar a dinâmica e o vigor da vegetação agrícola (Formaggio; Sanches, 2017). No entanto, existem limitações ao emprego em monitoramento sistemático de cultivos agrícolas, sendo uma das maiores dificuldades a disponibilidades de imagens livres de nuvens em todo o ciclo do desenvolvimento das culturas (Eberhardt et al., 2016). As constelações formadas por um conjunto de satélites portando sensores idênticos permitem melhorar a resolução temporal dos dados orbitais, aumentando as chances de disponibilidade de dados em diversos momentos do ciclo da cultura.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000049

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

A missão Sentinel-2, da Agência Espacial Europeia (ESA), é uma constelação mínima, formada por dois satélites em mesma órbita, polar e síncrona ao Sol, e defasados de 180º entre si. O sistema utiliza o sensor MSI (*MultiSpectral Instrument*) com 13 bandas espectrais, com resolução espacial de 10 m para as bandas azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, 20 m ou 60 m para as demais. Os dois satélites oferecem juntos uma resolução temporal de 5 dias em latitudes próximas ao Equador, chegando a 2 ou 3 dias em latitudes médias (https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2).

A área de estudo está localizada no município de Bagé (RS) e se encontra entre duas órbitas do Sentinel-2, em uma zona de sobreposição, resultando no dobro da resolução temporal padrão da missão, o que permite uma taxa de revisita de 12 imagens/mês. Embora existam constelações com resolução temporal diária, o Sentinel-2, além de suas características técnicas, oferece acesso livre às suas imagens.

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) foi proposto originalmente por Rouse et al. (1973) e é amplamente utilizado para avaliação e monitoramento dos sistemas agrícolas. Há muitos trabalhos utilizando NDVI a partir de diferentes sensores como o Modis e AVHRR/NOAA (Gurgel et al., 2003; Esquerdo et al., 2009; Trindade et al., 2019), mas o Sentinel-2 permite ampliar as aplicações na agricultura para situações que exigem uma melhor resolução espacial combinada a uma boa resolução temporal.

O objetivo deste trabalho é mostrar a aplicabilidade do uso dos dados Sentinel-2 em monitoramento de alta frequência, considerando as dificuldades de processar um grande volume de dados orbitais, e em que medida estes dados são úteis para o manejo do sistema.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo tem cerca de 13 ha e está localizada na fazenda experimental da Embrapa Pecuária Sul, em Bagé (RS). Todos os passos do processo são ilustrados na Figura 1. A primeira etapa é a seleção de imagens sem nuvens. As imagens do Sentinel-2 foram selecionadas e baixadas no site *EarthExplorer* (https://earthexplorer.usgs.gov/) da USGS (*United States Geological Survey)*. O conjunto de imagem cobriu um pouco mais de 24 meses do sistema ILP. Foram selecionadas 72 imagens sem interferências de nuvens de um total de 288 passagens do satélite, considerando as duas órbitas.

As imagens do repositório correspondem ao produto "L1C" da missão Sentinel-2, são imagens com a medida da reflectância no topo da atmosfera (*TOA – top-of-atmosphere*), ortorretificadas e registradas espacialmente para a projeção UTM, *datum* WGS84, em quadrículas de 100 km. A dimensão dos dados correspondentes a uma quadrícula é de aproximadamente 700 MB. O produto "L2A" adiciona a correção atmosférica, expressando a reflectância na superfície terres-

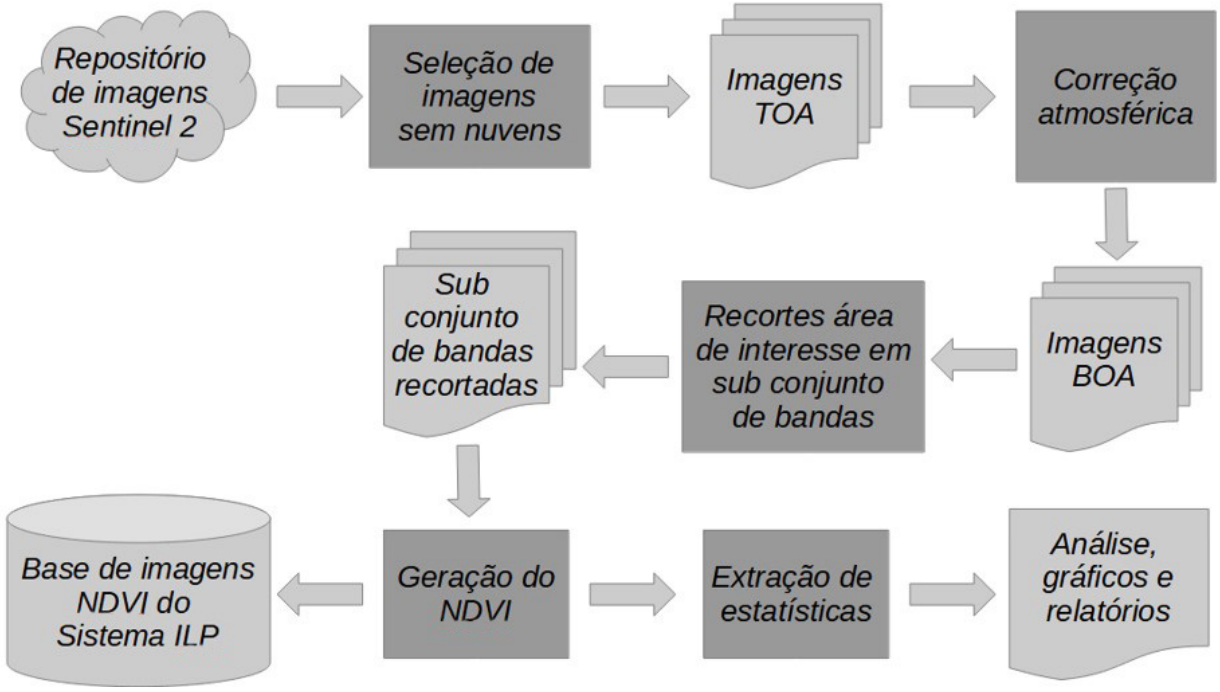


Figura 1. Esquema do processamento do conjunto de imagens.

tre, abaixo da atmosfera (*BOA – bottom-of-atmosphere*). Este produto é oferecido por demanda, mas pode também ser produzido pelo usuário utilizando o programa *sen2cor.py*, disponibilizado pela ESA. No nosso caso, foi desenvolvido um pequeno *script* na linguagem Python que executa esta correção para todas as imagens selecionadas (passagens) dispostas dentro de uma mesma pasta em um computador, como forma de automatizar esta etapa, já que o processamento de dezenas de imagens pode levar horas de processamento. A versão utilizada do *sen2cor.py* foi a V2.5.5 (ESA, 2018).

O conjunto de dados correspondendo a 72 passagens ocupa cerca de 36 GB. Na terceira etapa são selecionadas as bandas que serão efetivamente utilizadas e recortadas pelo polígono com os limites da área de interesse. Após esta etapa, boa parte de espaço em disco pode ser liberada. A quarta etapa é a geração das imagens NDVI para todas as passagens por operação entre bandas. Uma última etapa extrai estatísticas do conjunto de imagens NDVI (média e desvio-padrão) para as análises e geração de gráficos. Para a extração das estatísticas, foi utilizado um limite da área ligeiramente menor (buffer de 10 m) para retirar o efeito de borda. Para as etapas 3, 4 e 5 do diagrama da Figura 1, foram criados *scripts* em Python dentro do QGIS 3.22 para processamento em lote, de forma a tornar o processo mais eficiente. Isto foi necessário porque a análise foi feita em retrospectiva, e todos os dados foram tratados posteriormente. Se esse processo for executado durante o desenvolvimento das culturas, efetivamente como um monitoramento, cada passagem será executada isoladamente, no prazo de uma a duas horas, dependendo da capacidade de processamento, para produzir os resultados correspondentes.

Algumas das etapas do processo foram otimizadas, integral ou parcialmente, como forma de tornar o processo mais eficiente. Foram analisados pouco mais de 24 meses de dados, abrangendo dois ciclos completos de um sistema Integração Lavoura-Pecuária (ILP), com soja no verão e azevém no inverno. Na avaliação do sistema ILP, foi utilizado o NDVI médio da área como medida quantitativa do seu desenvolvimento ao longo do tempo, e o desvio-padrão em cada passagem como medida da variabilidade espacial deste desenvolvimento. São apresentados e discutidos os perfis de variação do NDVI e mapas ao longo dos dois ciclos do sistema ILP.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando as 72 imagens aproveitáveis (livre de nuvens), a taxa de aproveitamento média das imagens do Sentinel-2 ficou em torno de 25%. Em média, teríamos três imagens boas por mês, o que é razoável com os objetivos do trabalho. Porém, esta distribuição não é regular. Isto demonstra que taxas de revisita maiores seriam mais indicadas para o monitoramento em alta frequência, de forma a não faltar dados em momentos decisivos do monitoramento.

A Figura 2 apresenta a evolução do $NDVI_m$ (média dos valores dos pixels da imagem NDVI da área) ao longo dos dois ciclos completos do sistema ILP. O primeiro

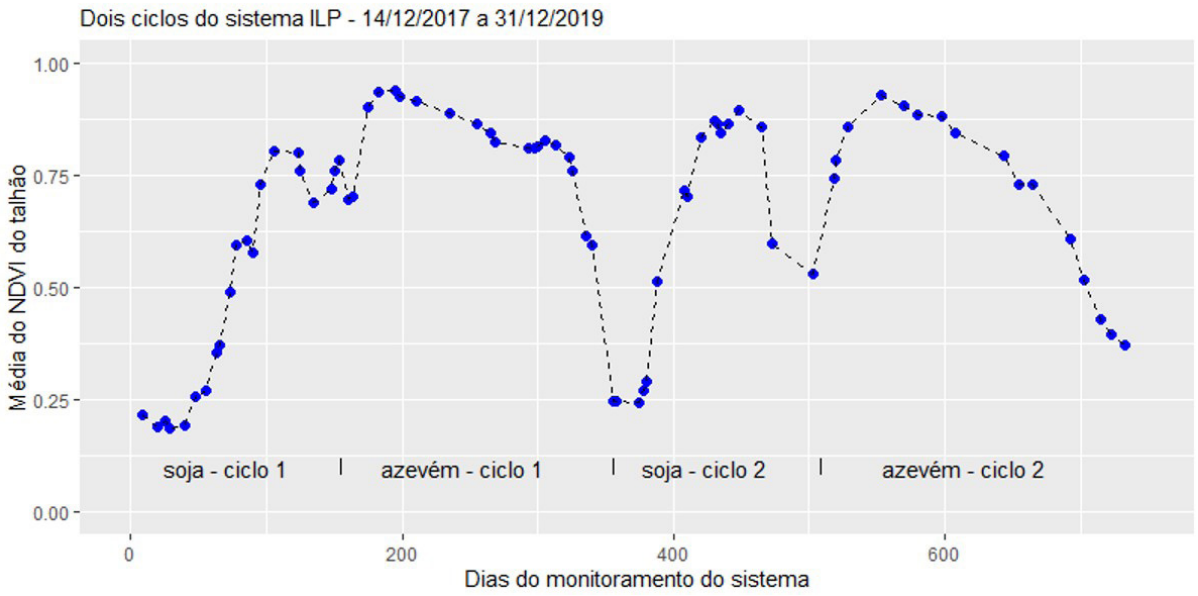


Figura 2. Dinâmica do NDVI médio durante dois ciclos completos do sistema ILP.

ciclo iniciou-se com o plantio da soja em dezembro de 2017, sucedida pelo azevém a partir de maio de 2018, até o novo plantio da soja, em dezembro de 2018. De forma similar ao primeiro ciclo, a soja foi sucedida pelo azevém (maio 2019) até a sua senescência no final de 2019. Podemos verificar no gráfico que o $NDVI_m$ é mais baixo nos dois momentos imediatamente após o plantio da soja, realizada pelo sistema de plantio direto sobre a palha do azevém do ciclo anterior. Após algumas semanas sem alteração significativa, o $NDVI_m$ da cultura da soja passa a crescer de forma rápida, até o fim dos estágios vegetativos, quando alcança um platô correspondente aos estágios reprodutivos da soja.

Crusiol et al. (2013), usando um instrumento de campo, levantou a curva do NDVI em função dos estágios fisiológicos de uma variedade específica da soja (BRS 284). Este estudo mostrou o crescimento acentuado dos valores do NDVI nos estágios vegetativos, e pequena variação nos estágios reprodutivos, com um pico do NDVI no estágio reprodutivo R4, denominado de estágio de vagem completamente desenvolvida (Neumaier et al., 2000). Infelizmente, não dispúnhamos de observações de campo para verificarmos esta relação. Após o ápice, nos estágios correspondentes à maturação das plantas (R7 e R8), o NDVI da soja entra em declínio, até a sua colheita. Logo após a colheita da soja, tanto no primeiro quanto no segundo ciclos aqui avaliados, o $NDVI_m$ não foi tão baixo como após o plantio da soja porque no campo provavelmente já existiam plantas do azevém, que rebrotam espontaneamente a partir do declínio da soja. Nos ciclos do azevém também ocorre um rápido aumento do $NDVI_m$, chegando ao ápice em torno de 40 dias após a colheita da soja. A partir daí, a cultura passa por um longo declínio, até atingir o estágio final, com queda mais acentuada dos valores de $NDVI_m$.

O comportamento do NDVI está diretamente associado à disponibilidade hídrica no solo. A pluviometria nos dois ciclos do sistema ILP foram bem distintas, sobretudo nos 90 Dias Após Semeadura (DAS) da soja. A Figura 3 detalha melhor a dinâmica do $NDVI_m$, separando os dois anos em gráficos distintos e mostrando em outro quadro (imediatamente abaixo) a distribuição diária da precipitação. No primeiro ciclo, a precipitação total até 90 DAS foi de 160,1 mm, e no segundo foi de 649,0 mm (quatro vezes maior).

A baixa intensidade e a má distribuição das chuvas provavelmente foram as responsáveis pela descontinuidade do crescimento da curva do $NDVI_m$ no primeiro ciclo da soja, exatamente no período correspondente aos ciclos vegetativos. Os dados que registraram esta inesperada queda do NDVI são relativos à passagem de 14/03/2018, correspondente a 90 DAS, imediatamente depois de uma estiagem de 11 dias. O maior valor registrado para o $NDVI_m$ no primeiro ciclo da soja foi 0,80, obtido na passagem de 29/03/2018 (105 DAS). Para o segundo ciclo da soja, o pico do $NDVI_m$ foi de 0,89, na passagem de 07/03/2019 (110 DAS). A produtividade da soja nos anos de 2018 e 2019 foram, respectivamente, 1,04 e 2,81 t/ha. Nota-se que a produtividade de 2018 foi fortemente afetada pela baixa disponibilidade hídrica.

Para o azevém, o pico do $NDVI_m$ no primeiro ciclo foi de 0,94, a 40 dias após a colheita da soja (40 DAC) referente à passagem de 27/06/2018. No segundo ciclo, o pico do $NDVI_m$ foi de 0,93, a 45 DAC, em 20/06/2019. Utilizamos a sigla DAC para referenciar o início do ciclo o azevém, em analogia à conhecida DAS, porque no sistema ILP avaliado não há uma semeadura para o azevém, que é manejado para a ressemeadura natural ao final do ciclo. Assim, o pasto se estabelece naturalmente, a cada período frio, a partir das sementes disponíveis no solo.

Outra informação disponibilizada na Figura 3 é o desvio-padrão (DP) do NDVI para cada passagem. O DP é uma boa indicação da variabilidade espacial das culturas de soja e azevém. Analisando os dois ciclos, vemos que o DP encontrado para a soja foi bem maior que o do azevém na plenitude das culturas nos dois ciclos, e os DP são maiores nas etapas correspondentes ao maior crescimento e nas fases finais dos ciclos em ambas as culturas.

Na Figura 4 são mostrados 16 mapas de NDVI para o sistema ILP em diferentes momentos, todos em uma mesma escala de cores para permitir a comparação entre as diferentes fases do sistema. São quatro passagens mapeadas para cada cultura nos dois ciclos. Neste conjunto de mapas, fica perceptível a variabilidade espacial do NDVI, demonstrando a importância da resolução espacial dos dados orbitais, sobretudo dentro da abordagem da Agricultura de Precisão, na qual a variabilidade interna do talhão é considerada. A resolução espacial de 10 m do Sentinel-2 fornece 100 amostras/ha. Outro fato perceptível foi que o azevém nos dois ciclos teve um desenvolvimento mais homogêneo que a soja.

Analisando os primeiros 4 mapas, correspondentes ao primeiro ciclo da soja, vemos que, na passagem de 03/01/2018 (20 DAS), a soja ainda não tem área foliar suficiente para afetar de forma significativa o NDVI e a imagem apresenta-se bem homogênea. Em 02/03/2018 (79 DAS), o NDVI apresenta um crescimento rápido relativo ao mapa anterior, e com grande variabilidade espacial (DP = 0,067). Esta passagem registrou o maior DP no primeiro ciclo da soja. Em 29/03/2018 (105 DAS), foi registrado o pico do $NDVI_m$ (0,80) para a soja no primeiro ciclo, um valor ruim, indicando

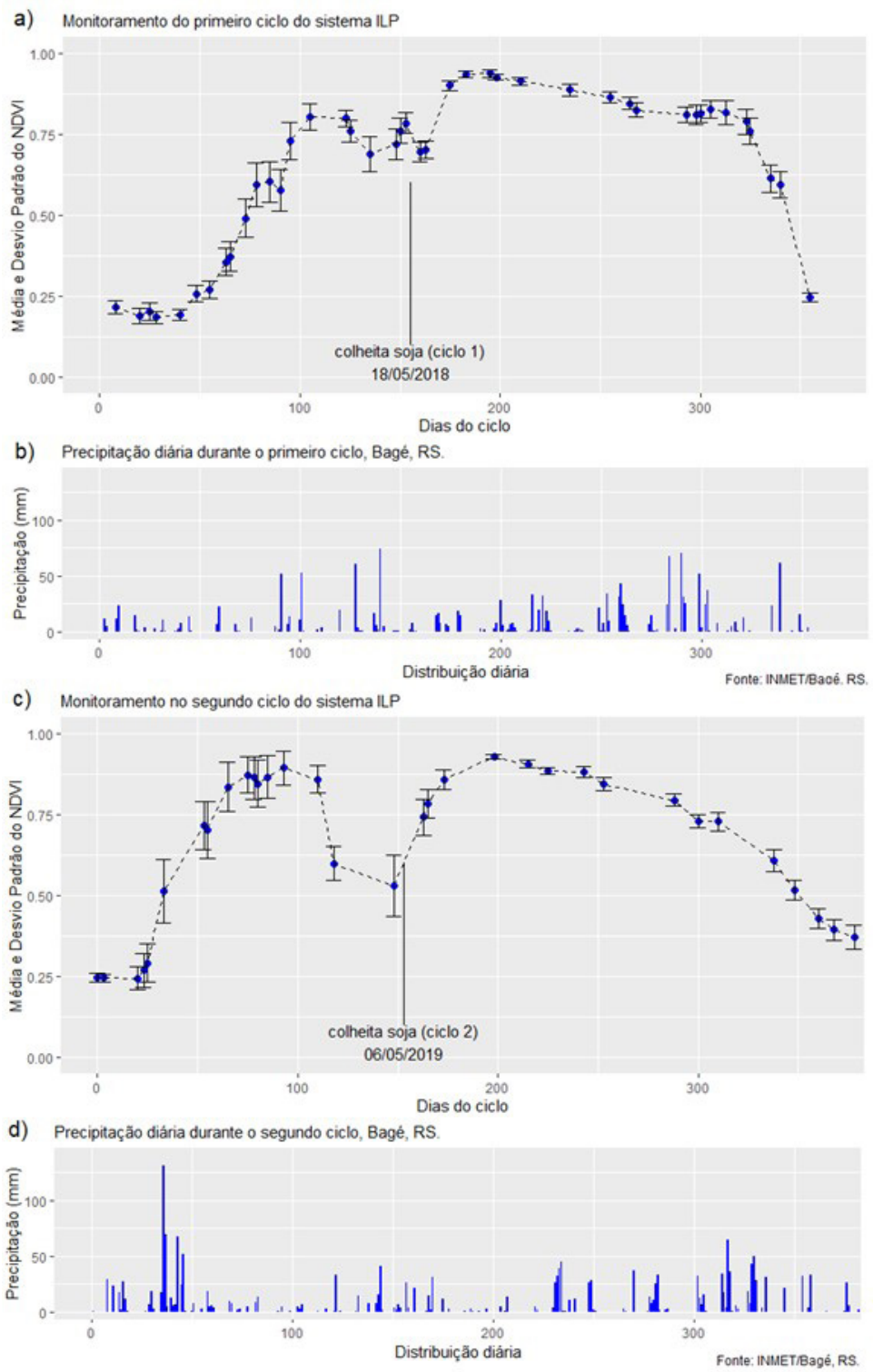


Figura 3. a): Dinâmica do NDVI médio ao longo do primeiro ciclo; b): Precipitação pluvial diária durante o primeiro ciclo; c): Dinâmica do NDVI médio ao longo do segundo ciclo; e d) Precipitação pluvial diária durante o segundo ciclo.

um desenvolvimento abaixo do esperado. O mapa de NDVI para a passagem de 16/05/2018 (153 DAS), há dois dias antes da colheita, resultou em um $NDVI_m$ = 0,79, quase no mesmo nível do pico do ciclo.

O primeiro mapa do primeiro ciclo do azevém é relativo à passagem de 23/05/2018, cinco dias após a colheita da soja (5 DAC). Em 27/08/2018 (40 DAC), foi obtido o pico do $NDVI_m$ para o azevém (0,94) e um DP: 0,012, mostrando o bom desenvolvimento do azevém e pouca variabilidade espacial em comparação com a soja. Este valor para o pico do $NDVI_m$ é também o maior valor entre todas as 72 medidas. Em 02/11/2018 (168 DAC),

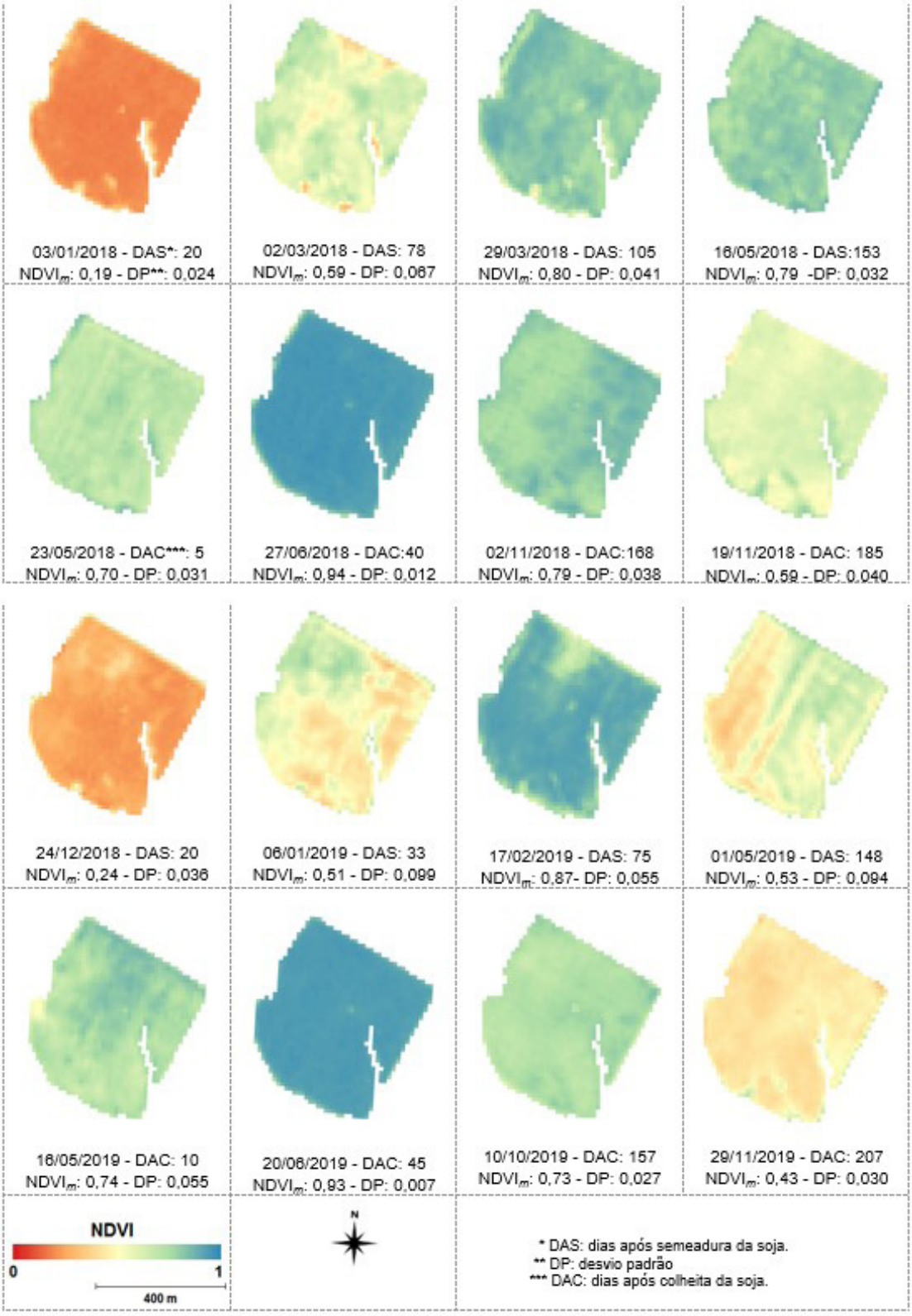


Figura 4. Mapas do NDVI ao longo dos dois ciclos do sistema ILP.

mais de quatro meses depois, o $NDVI_m$ registrado foi de 0,79, mostrando que, após o ápice, a queda do NDVI é relativamente lenta. É claro que a velocidade da queda depende de fatores ambientais, como a precipitação, e de manejo do sistema, como a lotação animal do pasto, por exemplo. Entretanto, uma queda suave é o comportamento desejável para a fase pastagem do sistema ILP. A partir desta data, a senescência do azevém acentua a queda do NDVI e, em 19/11/2018 (185 DAC), o $NDVI_m$ foi de 0,59 com o DP = 0,040.

O mapa NDVI de 24/12/2018 (20 DAS) registra o início do segundo ciclo da soja, mostra novamente um $NDVI_m$ baixo. Em 06/01/2019 (33 DAS), há um forte crescimento do $NDVI_m$ (0,51), apresentando a maior variabilidade encontrada para todas as passagens analisadas (DP = 0,099). O pico do $NDVI_m$ (0,87) para o segundo ciclo da soja foi registrado na passagem de 17/02/2019 (75 DAS). A maior disponibilidade hídrica no segundo ciclo afetou não somente o vigor da soja (indicado pelo $NDVI_m$), como encurtou o tempo para a cultura atingir o auge. O mapa de NDVI de 01/05/2019 (148 DAS) corresponde ao final do ciclo da soja, que foi colhida 5 dias depois desta passagem.

No segundo ciclo do azevém, a primeira passagem aproveitável após a colheita da soja foi em 16/05/2019 (10 DAC). Com mais 35 dias foi registrado o ápice do $NDVI_m$ (0,93). Como houve um grande período sem imagem aproveitável (25 dias), é provável que o ápice do azevém tenha ocorrido um pouco antes desta data. A variabilidade encontrada para esta passagem é a menor de todas as imagens analisadas (DP = 0,007), mostrando que o desenvolvimento do azevém foi bem mais homogêneo que a soja, pelo menos nos dois ciclos avaliados. Ressalta-se que a disponibilidade hídrica no solo tende a ser maior durante o período frio, onde a radiação incidente e a taxa de evapotranspiração são menores. Em 10/10/2019 (157 DAC), o $NDVI_m$ foi de 0,73 e no último mapa, em 29/11/2019 (207 DAC), o $NDVI_m$ de 0,43 devido ao final do ciclo do azevém.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com o monitoramento do NDVI ao longo de dois ciclos completos do sistema ILP se mostraram bastante coerentes quando confrontados com outros dados do sistema, como a produtividade da soja e a intensidade e distribuição da precipitação pluvial. Além disso, quando se comparam os valores do NDVI extraídos de passagens próximas, entre 2 e 3 dias, percebemos que os resultados estão consistentemente próximos. No entanto, faz-se necessário um estudo mais aprofundado para saber em que medida podemos usar os valores obtidos para o NDVI como referência para a tomada de decisão na gestão de um sistema agrícola, como, por exemplo, estimar a biomassa disponível na fase pasto, a fim de determinarmos a taxa de lotação ou nível de desfolha recomendado para as diferentes zonas no campo. Outro estudo pretendido no futuro próximo é verificar se existe correlação do mapa de produtividade da soja com os mapas de NDVI em diferentes estágios de desenvolvimento. O monitoramento a partir do NDVI de sistemas agrícolas usando imagens do Sentinel-2 ou de outras constelações atuais e futuras certamente será uma ferramenta importante, pois produz informação relevante e atualizada. As imagens do Sentinel-2 são disponibilizadas quase que imediatamente no repositório após a passagem dos satélites sobre o campo, de forma gratuita. O processo de produção das informações é razoavelmente simples e rápido.

REFERÊNCIAS

CRUSIOL, L. G. T.; NEIVERTH, W.; RIO, A.; SIBALDELLI, R. N. R.; FERREIRA, L. C.; CARVALHO, J. F. C.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. NDVI de estádios de desenvolvimento da soja BRS 284 em condições de campo. In: JORNADA ACADÊMICA DA EMBRAPA SOJA, VIII, 2013. **Anais** [...]. Londrina: Embrapa Soja, 2013. p. 87-91.

EBERHARDT, I. D. R.; SCHULTZ, B.; RIZZI, R.; SANCHES, I. D.; FORMAGGIO, A. R.; ATZBERGER, C.; MELLO, M. P.; IMMITZER, M.; TRABAQUINI, K.; FOSCHIERA, W.; LUIZ, A. J. B. Cloud cover assessment for operational crop monitoring systems in tropical areas. **Remote Sensing**, v. 8, n. 3, p. 219, 2016.

ESA. **Sen2Cor:** configuration and user manual. 2018. Disponível em: http://step.esa.int/thirdparties/sen2cor/2.5.5/docs/S2-PDGS-MPC-L2A-SUM-V2.5.5_V2.pdf. Acesso em: 30 set. 2024.

ESQUERDO, J. C. D. M.; ZULLO JÚNIOR, J.; ANTUNES, J. F. G. Uso de perfis multi-temporais de NDVI/AVHRR no acompanhamento da cultura da soja no oeste do Paraná. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XVIII (SBSR), 2009, Natal. **Anais** [...]. São José dos Campos: INPE, 2009. p. 145-150.

FORMAGGIO, A. R.; SANCHES, I. D. ***Sensoriamento remoto em agricultura.*** São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 288 p.

GURGEL, H. da C.; FERREIRA, N. J.; LUIZ, A. J. B. Estudo da variabilidade do NDVI sobre o Brasil, utilizando-se a análise de agrupamentos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 85-90, 2003. DOI: http://doi.org/10.1590/S1415-43662003000100014.

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B.; OYA, T. Estádios de desenvolvimento da cultura de soja. In: BONATO, E. R. (ed.). **Estresses em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. p. 19-44

ROUSE, J.W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, DC. **Proceedings** [...]. Washington, DC: NASA, 1973. v. 1, p. 309-317. Disponível em: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf. Acesso em: 30 set. 2024.

TRINDADE, F. S.; ALVES, M. de C.; NOETZOLD, R.; ANDRADE, I. C. de; POZZA, A. A. A. Relação espectro-temporal de índices de vegetação com atributos do solo e produtividade da soja. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 62, p. 1-11, 2019.

Variabilidade espacial do crescimento do eucalipto em um sistema de integração lavoura-pecuária-floresta parcialmente atingido por incêndio

Spatial variability of eucalyptus growth in a crop-livestock-forestry integrated system partially affected by fire

Luana Selli[1], José Ricardo Macedo Pezzopane[2], Teresa Cristina Alves[3], Alberto Carlos de Campos Bernardi[4]

[1] *Especialista em Ciência de Dados e Inteligência Artificial / Engenheira Ambiental, Xmobots, São Carlos (SP), Brasil, luanaselli@hotmail.com*

[2] *Doutor, Engenheiro Agrônomo, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, jose.pezzopane@embrapa.br*

[3] *Doutora, Médica Veterinária, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil,teresa.alves@embrapa.br*

[4] *Doutor, Engenheiro Agrônomo, Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos (SP), Brasil, alberto.bernardi@embrapa.br*

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi aplicar a análise espacial para dimensionar impactos de um incêndio em um sistema ILPF em São Carlos/SP. O estudo foi realizado em uma área de 12,86 ha, que compreende o sistema ILPF Produção de Leite, na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos/SP. Foram realizadas medições da altura, do diâmetro e do volume de madeira das árvores. Os dados coletados foram armazenados, tratados e interpolados em ambiente SIG. Em julho de 2020 parte do sistema de produção foi atingido por um incêndio acidental. Os dados levantados em 2021 foram comparados com dados de 2019 e 2020, criando-se um histórico de desenvolvimento da área em cenários pré e pós-incêndio. Estimou-se que o fogo causou uma perda de 10% do volume total de madeira total do sistema. Os resultados evidenciaram os impactos negativos do incêndio causou no sistema de produção integrado, e como as técnicas e ferramentas de geoprocessamento contribuíram para dimensionar os efeitos dos danos causados pelo incêndio e subsidiar a tomada de decisão no manejo dos sistemas agropecuários.

Palavras-chave: geoprocessamento; análise espacial; interpolação IDW; sistemas de produção integrados; ILPF.

ABSTRACT

This work aimed to apply spatial analysis to evaluate the fire impacts in an integrated crop-livestock-forest system (ICLFS) in São Carlos-SP. The study was carried out in an area of 12.86 ha that comprises the ICLF Dairy system, at Embrapa Pecuária Sudeste, in São Carlos/SP. Trees' height and diameter, as well as wood volume, were periodically measured. The collected data were stored, processed, and interpolated in SIG. In July 2020, part of the production system was hit by an accidental fire. The data collected in 2021 were compared with those from 2019 and 2020, creating a history of tree growth in pre- and post-fire scenarios. It was estimated that the fire caused a loss of 10% of the total wood volume in the system. The results confirmed the negative impacts caused by the fire on the ICLFS, and how the geoprocessing techniques and tools contributed to scaling the damage effects caused by the fire and subsidizing decision-making in agricultural systems management.

Keywords: geoprocessing; spatial analysis; IDW interpolation; integrated production systems; ICLFS.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000050

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

No geoprocessamento, a análise espacial permite extrair e gerar novas informações e significados de dados pontuais georreferenciados originais. Essa análise é executada em um sistema de informação geográfica (SIG), que possibilita a interpolação de dados (Filippini-Alba, 2014). A interpolação espacial utiliza pontos vetoriais com valores conhecidos para estimar os valores em outros pontos desconhecidos, gerando uma superfície de toda a área ou uma camada *raster*. Existem diversos métodos de interpolação como o inverso ponderado da distância, krigagem, curvatura mínima ou *spline*, vizinho mais próximo, triangulação com interpolação linear médias móveis e polinômio local, entre outros. É essencial definir um método de interpolação adequado que otimize a estimativa dos valores desconhecidos. A técnica da ponderação pelo inverso da distância, ou *Inverse Distance Weighting* – IDW é a de interpolação mais utilizada pela fácil aplicação, baseada na distância ponderada de pontos amostrais (Tomczak, 1998; Henley, 2012). Na interpolação com o IDW, as amostras de pontos são ponderadas, de acordo com a influência de um ponto relativo a outro, e declina com a distância a partir de um ponto desconhecido estimado.

A interpretação dos mapas derivados da interpolação de dados, pelos diferentes métodos, permite a identificação de regiões em que o fenômeno em estudo é mais ou menos uniforme (Grego et al., 2014). Dessa forma, a utilização do geoprocessamento permite realizar análises climáticas, edáficas e botânicas aplicadas ao manejo de sistemas de produção agropecuário, e com isso proporcionar ganhos relacionados à redução dos impactos ambientais, economia de insumos, aumento da produtividade e qualidade dos produtos.

Os incêndios são um dos principais fatores de danos e da redução da extensão das florestas do mundo (Goldammer, 1999; Cochrane, 2003). No entanto, as consequências dos incêndios ainda não são bem compreendidas (Cochrane, 2003), e, até recentemente, trabalhos sobre o impacto de incêndios em florestas tropicais eram raros devido à sua baixa recorrência natural. No entanto, as mudanças nas ocorrências de incêndios têm sido claramente ligadas à interferência humana nesses sistemas e às mudanças climáticas (Juárez-Orozco et al., 2017).

O fogo altera de forma direta ou indireta os atributos físicos, químicos e biológicos do solo (Redin et al., 2011), dependendo de sua intensidade, duração e das características do ecossistema atingido (ex. composição vegetal, topografia, clima etc.). Há também profundas alterações fisiológicas nas árvores. As lesões causadas pelo calor de um incêndio podem desencadear uma série de complexos mecanismos que afetam a fisiologia das árvores após o evento. Bär et al. (2019) demonstraram que a necrose do câmbio e floema induzidos pelo fogo e o dano ao xilema são os principais efeitos, levando a disfunção hidráulica e má distribuição de compostos de carbono internamente nas árvores. Além disso, incêndios fora de controle podem levar a severos danos econômicos, pois podem destruir plantações, pastagens, reflorestamentos, madeira, infraestrutura (cercas, edifícios etc.) e rebanhos (Cochrane, 2003).

Os impactos causados por queimadas, em qualquer elemento da biota, dependem tanto das características do ecossistema atingido quanto do comportamento do próprio fogo, levando em conta sua velocidade, intensidade, calor liberado, distribuição e duração de temperaturas elevadas (Miranda; Klink, 1996). O objetivo deste trabalho foi aplicar a análise espacial para dimensionar impactos de um incêndio em um sistema ILPF em São Carlos/SP.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudos

Foi utilizada a unidade de referência tecnológica (URT) "Integração Lavoura-Pecuária-Floresta para produção de leite de baixo carbono (ILPF Leite)", situada na área experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos/SP. A área em estudo é subdividida em dois sistemas de produção distintos, sendo um sistema silvipastoril (IPF) e um sistema agrossilvipastoril (ILPF) com as características descritas na Tabela 1.

Um incêndio acidental atingiu parte do sistema ILPF Leite da Embrapa Pecuária Sudeste em 28/jul./2020 (Figura 1A). A ocorrência foi considerada de grandes proporções, com chamas atingindo cerca de 20 m de altura. Apesar de intensa, a ocorrência do fogo foi rápida e passageira. Assim que controlado, verificou-se que a área sul do sistema não foi afetada, porém a área norte do sistema (IPF) foi duramente afetada, acarretando a queima de 4,26 ha de terra, o equivalente a 33,13% da área total do sistema ILPF Leite e a 65,54% da área IPF (Figura 2). O sistema demonstrou boa resiliência após o incêndio. A maioria das árvores e pastagens atingidas pelo fogo rebrotou com vigor e foi possível retomar a produção animal na área após o período de chuvas (Figura 1B). Com o intuito de estimar o impacto que o incêndio gerou na região, a área de estudos foi fragmentada em três subdivisões, sendo elas: A = área sul não incendiada, B =

Tabela 1. Características do sistema ILPF Leite em São Carlos/SP.

Sistema	Tipo	Área (ha)	Plantio	Espaçamento (m)		Culturas
				Entre linhas	Entre árvores	
IPF	Silvipastoril	6,50 ha	Linha simples	20-25	3	Eucalipto Citrodora (*Corymbia citriodora* + capim paiaguás (*Urochloa brizantha)*
ILPF	Agrossilvipastoril	6,36 ha	Linha simples	20-25	3	Eucalipto Citrodora (*Corymbia citriodora* + capim paiaguás (*Urochloa brizantha)* + milho (*Zea mays*)

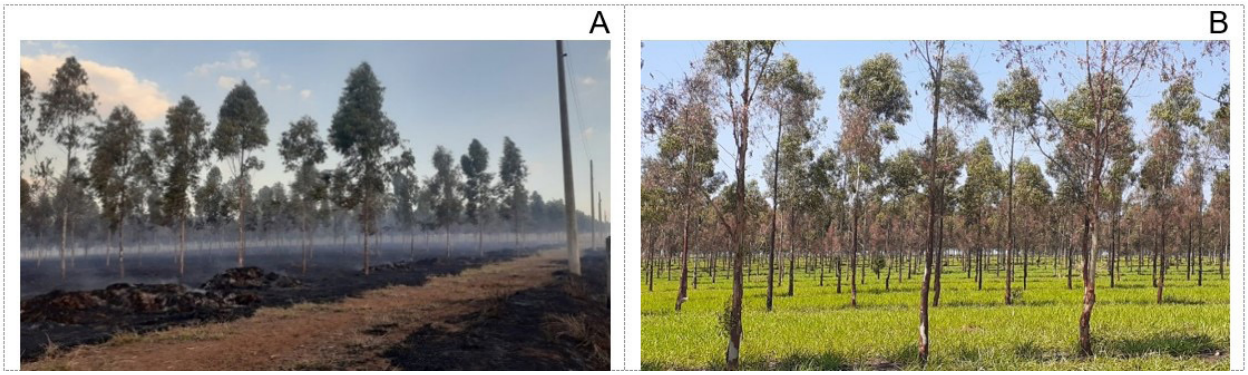


Figura 1. Imagens da área atingida do ILPF Leite (A) e em final de outubro de 2020 (B) após retorno do período das chuvas. Fotos: Gisele Rosso (A), André Novo (B).

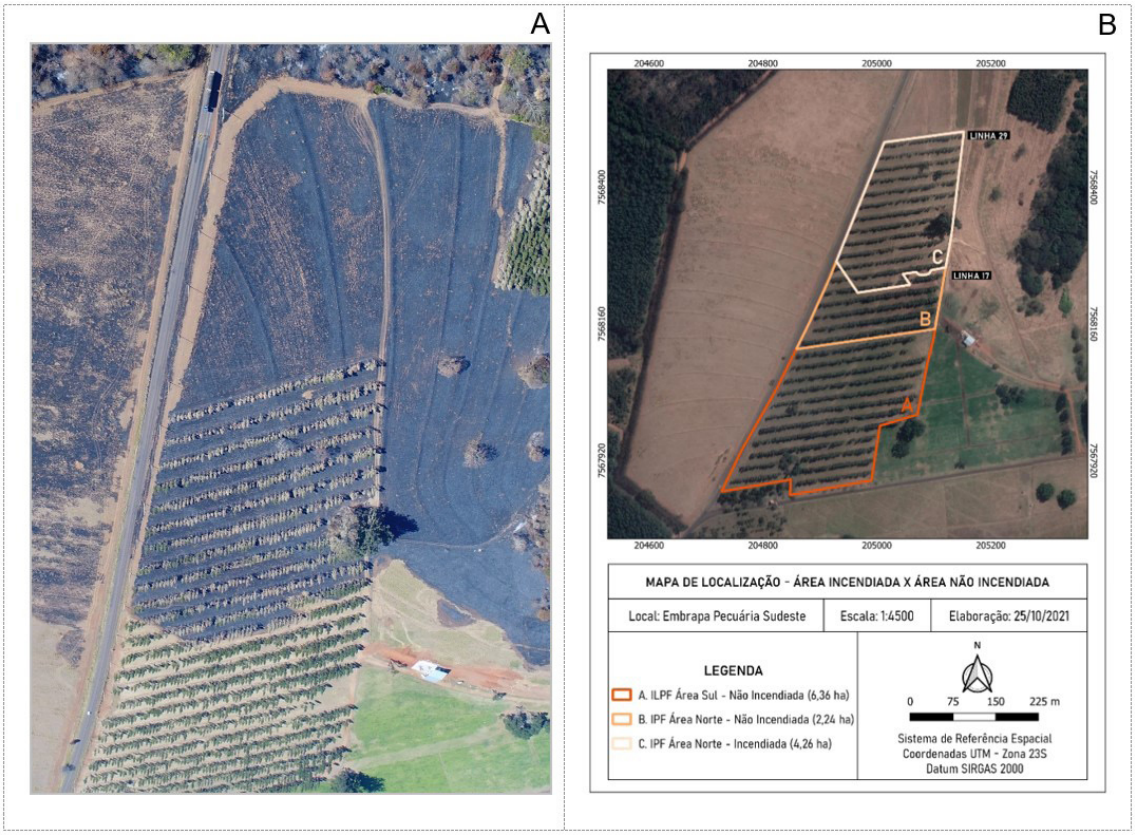


Figura 2. Imagem aérea da área atingida do ILPF Leite (A) e mapa de subdivisões do sistema ILPF Leite (B). Foto aérea: Ricardo Justiniano.

área norte não incendiada, e C = área norte incendiada (Figura 2B).

2.2 Medidas do crescimento das árvores

O sistema ILPF Leite é composto por 29 linhas de árvores, e a coleta das medidas de altura, diâmetro à altura do peito (DAP), ocorre periodicamente em 20 plantas de 20 linhas indicadas.

Os dados de altura de 400 árvores de eucalipto do sistema ILPF Leite foram coletados com o auxílio de um hipsômetro eletrônico Haglof®, em março de 2019, 2020 e 2021. A partir de uma distância conhecida do aparelho até o alvo, o equipamento calcula com precisão a altura e mostra imediatamente o resultado em seu visor interno (Oliveira et al., 2014). Os dados de DAP das árvores de eucalipto foram obtidos com fita métrica. Com o valor da medida da circunferência do tronco na altura de 1,30 m, foi possível calcular o DAP da árvore a partir da relação entre as grandezas do perímetro de uma circunferência e seu diâmetro, utilizando a Equação 1:

$$DAP = \frac{CAP}{\pi} \quad (1)$$

Onde, DAP = diâmetro do tronco à altura do peito (1,30 m) e CAP = circunferência à altura do peito (1,30 m).

A partir dos dados médios de altura e DAP coletados em campo, e do constante fator de forma do eucalipto (0,45), foi possível calcular o volume médio das árvores presentes no sistema ILPF Leite utilizando a Equação 2:

$$Ve = \pi \cdot (\frac{DAP}{2})^2 \cdot h \cdot 0,45 \quad (2)$$

Onde, Ve = volume do eucalipto (m^3); DAP = diâmetro do tronco (m); h = altura da árvore (m); 0,45 = fator de forma do eucalipto citriodora.

2.3 Processamento dos dados e interpolação

Os dados foram transferidos para uma planilha digital e vinculados às suas devidas coordenadas geográficas previamente coletadas em campo com GPS portátil. No software QGIS 3.16.9. foram interpolados os dados de altura, DAP e volume por meio do método *Inverse Distance Weighted* – IDW (inverso ponderado da distância). A interpolação utilizou os pontos referentes a cada bloco de árvores, que possuem valores médios de altura, DAP e volume já conhecidos da medição prévia em campo, para estimar os valores das demais árvores de eucalipto que não tiveram seus dados coletados em campo, cobrindo assim a superfície de toda a área do sistema ILPF Leite.

2.4 Estimativas de volume e balanço financeiro

O volume de madeira do sistema ILPF Leite foi estimado e calculada a perda gerada pelo incêndio que atingiu a área norte do sistema ILPF Leite. Para isso, foi calculado o valor aproximado de volume de madeira presente no sistema na última coleta de dados (maio de 2021). A partir desse valor, foi estimado o equivalente financeiro referente ao volume total. Posteriormente, foi estimado o quanto o mesmo sistema estaria rendendo nesta mesma data caso o incêndio não tivesse ocorrido. Para fazer essa estimativa, foi utilizado o valor médio de 141 árvores plantadas por hectare no sistema, o volume médio de madeira por classe e o menor preço encontrado do metro cúbico do eucalipto (R$ 38,70), para uso em energia, conforme estabelecido por cotação do Instituto de Economia Agrícola (Instituto de Economia Agrícola, 2018).

Subtraindo o volume (m^3) e o valor de madeira total presente no sistema no cenário pós-incêndio (real) do valor total estimado no cenário sem incêndio (simulado), foi possível estimar a perda de volume e financeira gerada pelo incêndio.

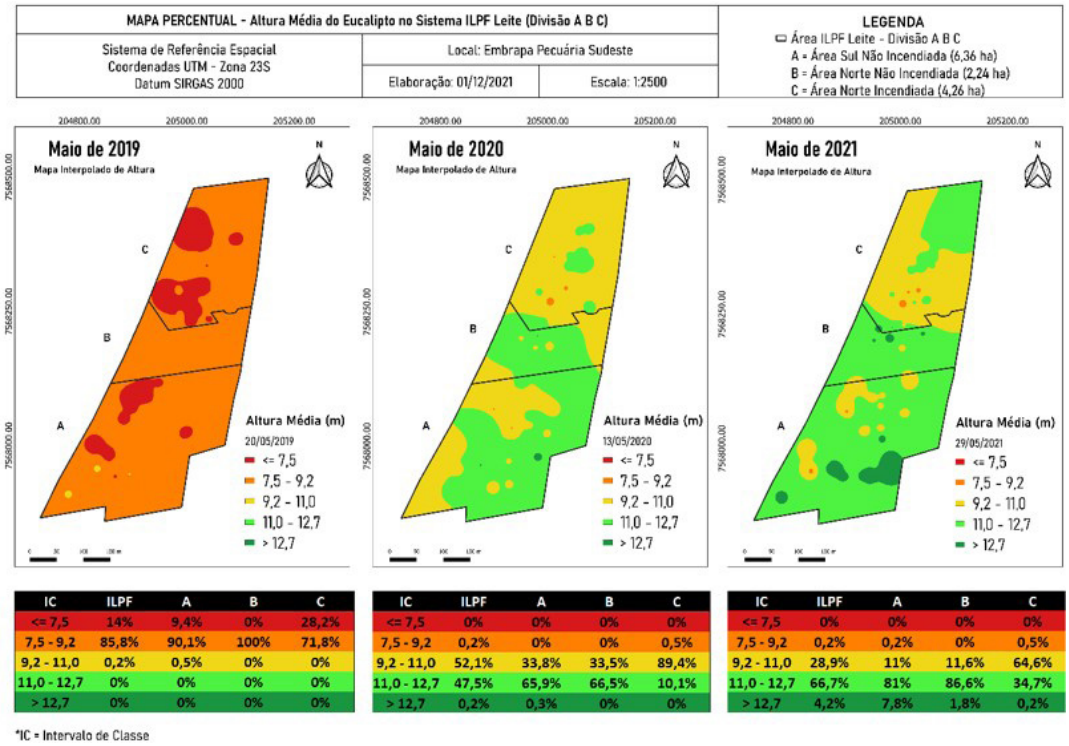
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fogo é uma reação química que libera energia na forma de calor e luz e altera a estrutura da vegetação, convertendo os combustíveis em uma série de produtos da combustão que podem permanecer no local (como carvão e cinzas) ou ser transportados do local, como os aerossóis (Cochrane, 2003). O grau com que a vegetação é impactada pelo fogo depende dos fluxos de calor incidentes nas várias partes da planta, que é resultado da intensidade da linha de fogo e do tempo de residência (Bär; Michaletz; Mayr, 2019).

3.1 Evolução da altura e DAP das árvores e do volume de madeira

Entre 2019 e 2020, embora houvesse variações no ritmo de crescimento, todas as árvores do sistema aumentaram a altura, modificando a classe de crescimento. É interessante observar que, já em 2020, antes do incêndio, a área norte do sistema (IPF) apresentava, em partes, um padrão de crescimento mais lento em comparação à área sul (ILPF). Já de 2020, antes do incêndio, para 2021, após o incêndio, as árvores não incendiadas se mantiveram nas classes mais altas de crescimento, enquanto a área incendiada sofreu uma estagnação parcial (Figura 3).

Em 2019, 68% das árvores do sistema se encontravam no intervalo de classe inicial de desenvolvimento, embora a região sul já apresentasse um desenvolvimento mais elevado quanto ao seu diâmetro



IC	ILPF	A	B	C
<= 7,5	14%	9,4%	0%	28,2%
7,5 - 9,2	85,8%	90,1%	100%	71,8%
9,2 - 11,0	0,2%	0,5%	0%	0%
11,0 - 12,7	0%	0%	0%	0%
> 12,7	0%	0%	0%	0%

IC	ILPF	A	B	C
<= 7,5	0%	0%	0%	0%
7,5 - 9,2	0,2%	0%	0%	0,5%
9,2 - 11,0	52,1%	33,8%	33,5%	89,4%
11,0 - 12,7	47,5%	65,9%	66,5%	10,1%
> 12,7	0,2%	0,3%	0%	0%

IC	ILPF	A	B	C
<= 7,5	0%	0%	0%	0%
7,5 - 9,2	0,2%	0,2%	0%	0,5%
9,2 - 11,0	28,9%	11%	11,6%	64,6%
11,0 - 12,7	66,7%	81%	86,6%	34,7%
> 12,7	4,2%	7,8%	1,8%	0,2%

*IC = Intervalo de Classe

Figura 3. Mapa espacializado da altura das árvores de eucalipto Citrodora no sistema ILPF Leite em São Carlos/SP.

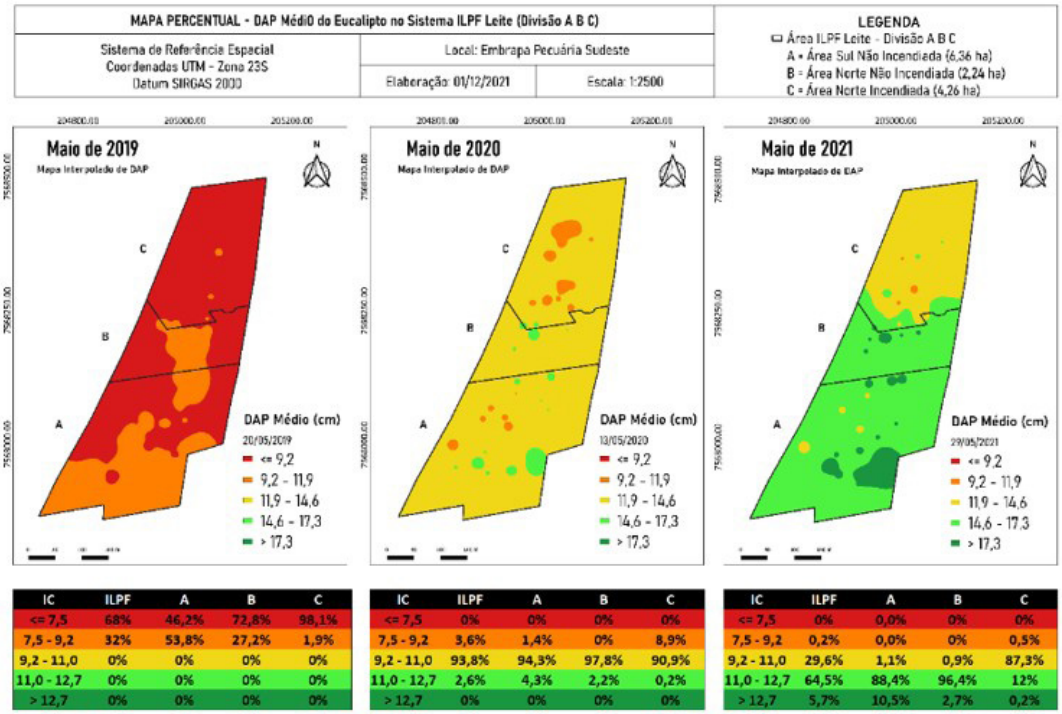
(Figura 4). Em 2020 foi possível observar que a diferença de desenvolvimento das árvores fora praticamente sanada, as áreas norte e sul se equipararam quanto ao tamanho de seus diâmetros. De 2020, antes do incêndio, para 2021, após o incêndio, foi possível constatar que as árvores presentes nas áreas A e B não atingidas pelo incêndio mantiveram sua taxa de desenvolvimento equiparadas, enquanto as árvores presentes na área C, afetadas pelo incêndio, não conseguiram acompanhar a taxa de desenvolvimento observada nas áreas não incendiadas e permaneceram da mesma classe que se encontravam em 2020.

Em 2019 todas as árvores do sistema ILPF Leite, sem exceções, se encontravam no intervalo de classe inicial de desenvolvimento (Figura 5). Em 2020 foi possível notar que o desenvolvimento das árvores, com relação ao seu volume, se manteve em um padrão semelhante. De 2020, antes do incêndio, para 2021, após o incêndio, foi possível verificar que o padrão de crescimento, que se mantinha semelhante até então, fora significantemente alterado. Embora a maior parte do sistema (48,8%) tenha se mantido no padrão esperado, subindo um nível de classe, a área C, afetada pelo incêndio, reduziu seu desenvolvimento e se manteve no nível de volume de madeira do ano anterior. A diminuição do crescimento provavelmente é devido ao desbalanço no suprimento interno de carboidratos (Bär; Michaletz; Mayr, 2019), uma vez que após o fogo houve intensa perda de folhas, e as folhas novas não estão aptas a sustentar a necessidade de fotossintetados.

Por isso, a frequência de ocorrência de queimadas pode ser crucial (Cochrane, 2003) para o crescimento e manutenção de ecossistemas naturais ou para exploração comercial. Queimadas mesmo que leves podem levar a atrasos e perda de crescimento das árvores.

3.2 Balanço financeiro

Após ser constatado que o fogo, de fato, retardou o desenvolvimento das árvores de eucalipto atingidas pelo incêndio, foi realizado um balanço de perda de volume e, consequentemente, do prejuízo financeiro causada pelo incidente (Figura 6). No cenário real, pós-incêndio, a área total do sistema ILPF Leite apresentou um volume total de 180,446 m^3 de madeira de eucalipto, com potencial de rendimento de cerca de R$ 6.983,27 com base nos dados de Instituto de Economia Agrícola (2018). No cenário simulado, no qual o incêndio não teria ocorrido, as árvores da subdivisão C manteriam o padrão de desenvolvimento observado no restante do sistema, subindo de classe ano a ano, sem ter seu crescimento retardado. Nesse cenário, é estimado que a área total do sistema ILPF Leite apresentaria um volume total de 200,599 m^3 de madeira de eucalipto, rendendo aproximadamente R$ 7.761,64.



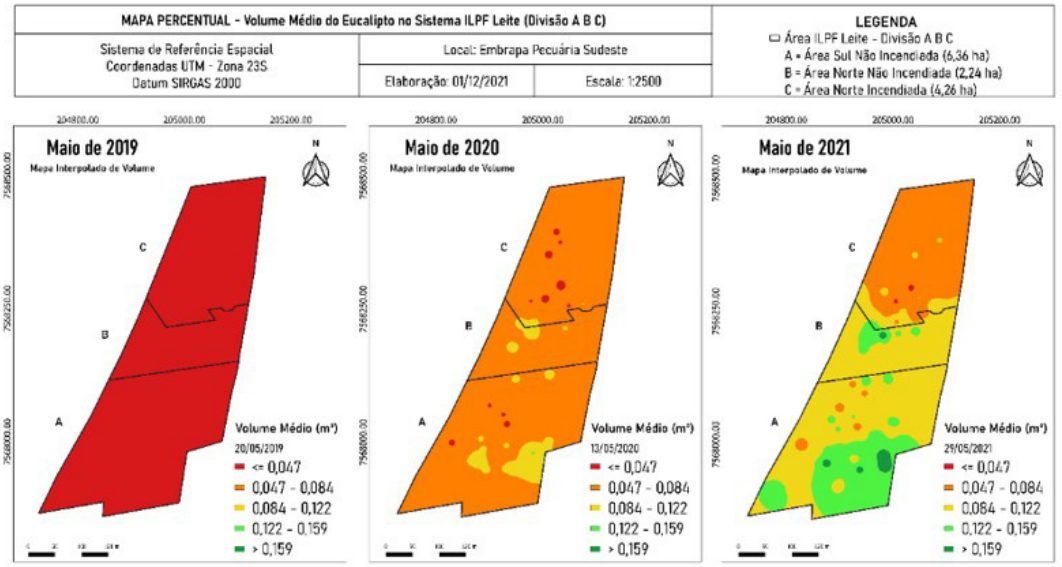
IC	ILPF	A	B	C
<= 7,5	68%	46,2%	72,8%	98,1%
7,5 - 9,2	32%	53,8%	27,2%	1,9%
9,2 - 11,0	0%	0%	0%	0%
11,0 - 12,7	0%	0%	0%	0%
> 12,7	0%	0%	0%	0%

IC	ILPF	A	B	C
<= 7,5	0%	0%	0%	0%
7,5 - 9,2	3,6%	1,4%	0%	8,9%
9,2 - 11,0	93,8%	94,3%	97,8%	90,9%
11,0 - 12,7	2,6%	4,3%	2,2%	0,2%
> 12,7	0%	0%	0%	0%

IC	ILPF	A	B	C
<= 7,5	0%	0,0%	0%	0%
7,5 - 9,2	0,2%	0,0%	0%	0,5%
9,2 - 11,0	29,6%	1,1%	0,9%	87,3%
11,0 - 12,7	64,5%	88,4%	96,4%	12%
> 12,7	5,7%	10,5%	2,7%	0,2%

*IC = Intervalo de Classe

Figura 4. Mapa espacializado do diâmetro à altura do peito (DAP) das árvores de eucalipto Citrodora no sistema ILPF Leite em São Carlos/SP.



IC	ILPF	A	B	C
<= 0,047	100%	100%	100%	100%
0,047 - 0,084	0%	0%	0%	0%
0,084 - 0,122	0%	0%	0%	0%
0,122 - 0,159	0%	0%	0%	0%
> 0,159	0%	0%	0%	0%

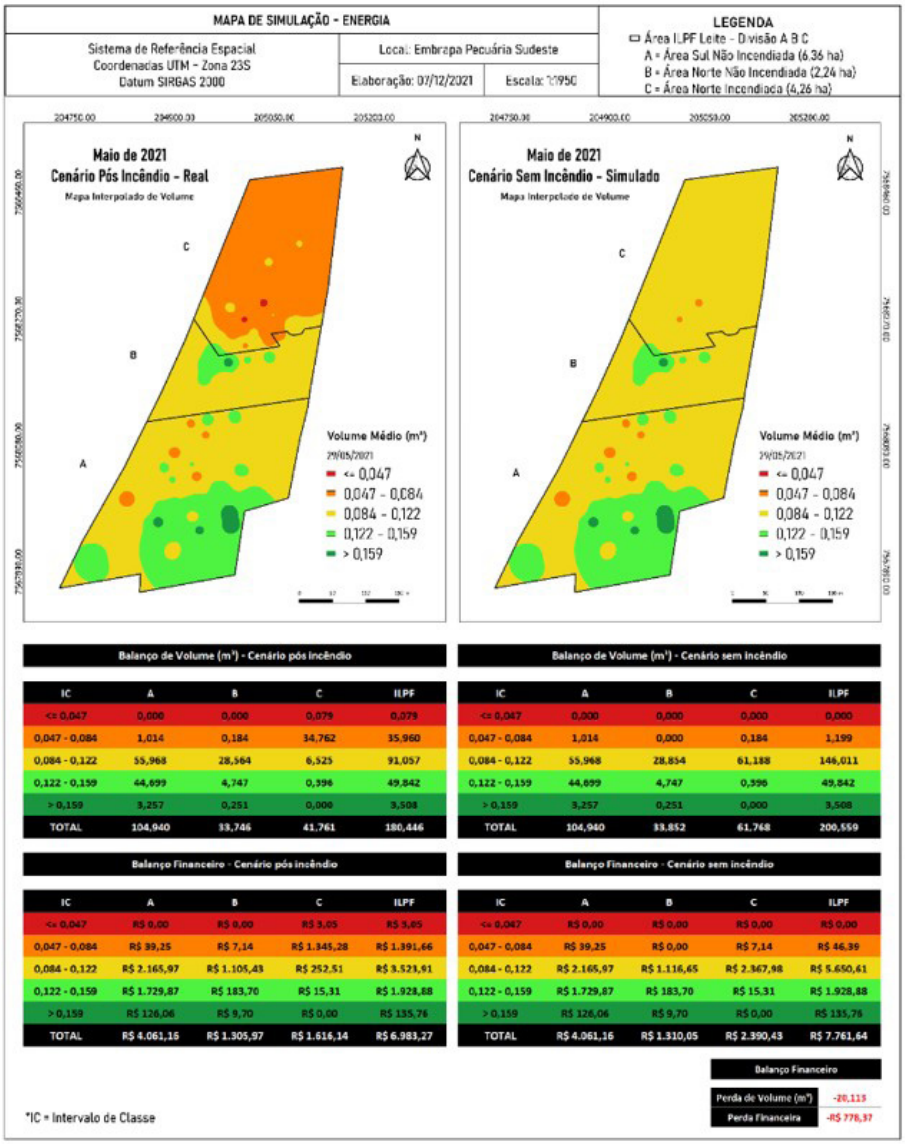
IC	ILPF	A	B	C
<= 0,047	1%	0,5%	0%	2,3%
0,047 - 0,084	92,8%	89,6%	94,2%	96,5%
0,084 - 0,122	6,1%	9,7%	5,8%	1,2%
0,122 - 0,159	0,1%	0,2%	0%	0%
> 0,159	0%	0%	0%	0%

IC	ILPF	A	B	C
<= 0,047	0,2%	0,0%	0%	0,5%
0,047 - 0,084	30,2%	1,7%	0,9%	88,5%
0,084 - 0,122	48,8%	60,7%	87,9%	10,5%
0,122 - 0,159	19,6%	35,5%	10,7%	0,5%
> 0,159	1,2%	2,1%	0,5%	0%

*IC = Intervalo de Classe

Figura 5. Mapa espacializado do volume de madeira das árvores de eucalipto Citrodora no sistema ILPF Leite em São Carlos/SP.

Comparando os dois cenários, pós-incêndio e sem incêndio, é possível estimar uma perda de 20,133 m^3 de madeira no sistema, ou aproximadamente 10% do total de volume. Considerando financeiramente, houve uma perda de R$ 778,37, em um cenário em que a madeira fosse vendida para geração de energia. Além das esperadas e óbvias perdas financeiras (Cochrane, 2003), Bär et al. (2019) alertam que pode haver efei-



IC	A	B	C	ILPF
<= 0,047	0,000	0,000	0,079	0,079
0,047 - 0,084	1,014	0,184	34,762	35,960
0,084 - 0,122	55,968	28,564	6,525	91,057
0,122 - 0,159	44,699	4,747	0,396	49,842
> 0,159	3,257	0,251	0,000	3,508
TOTAL	104,940	33,746	41,761	180,446

IC	A	B	C	ILPF
<= 0,047	0,000	0,000	0,000	0,000
0,047 - 0,084	1,014	0,000	0,184	1,199
0,084 - 0,122	55,968	28,854	61,188	146,011
0,122 - 0,159	44,699	4,747	0,396	49,842
> 0,159	3,257	0,251	0,000	3,508
TOTAL	104,940	33,852	61,768	200,559

IC	A	B	C	ILPF
<= 0,047	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 3,05	R$ 3,05
0,047 - 0,084	R$ 39,25	R$ 7,14	R$ 1.345,28	R$ 1.391,66
0,084 - 0,122	R$ 2.165,97	R$ 1.105,43	R$ 252,51	R$ 3.523,91
0,122 - 0,159	R$ 1.729,87	R$ 183,70	R$ 15,31	R$ 1.928,88
> 0,159	R$ 126,06	R$ 9,70	R$ 0,00	R$ 135,76
TOTAL	R$ 4.061,16	R$ 1.305,97	R$ 1.616,14	R$ 6.983,27

IC	A	B	C	ILPF
<= 0,047	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00
0,047 - 0,084	R$ 39,25	R$ 0,00	R$ 7,14	R$ 46,39
0,084 - 0,122	R$ 2.165,97	R$ 1.116,65	R$ 2.367,98	R$ 5.650,61
0,122 - 0,159	R$ 1.729,87	R$ 183,70	R$ 15,31	R$ 1.928,88
> 0,159	R$ 126,06	R$ 9,70	R$ 0,00	R$ 135,76
TOTAL	R$ 4.061,16	R$ 1.310,05	R$ 2.390,43	R$ 7.761,64

Figura 6. Mapa de balanço financeiro num cenário simulado em que a madeira das árvores de eucalipto do sistema ILPF Leite em São Carlos/SP fosse vendida para energia.

tos adversos do fogo nas árvores, ampliando os impactos negativos da seca e da ocorrência de danos por insetos, por exemplo.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que houve atraso significativo no desenvolvimento das árvores de eucalipto Citrodora na área atingida pelo incêndio, principalmente com relação ao seu DAP, altura, e consequentemente no volume, quando comparadas com as árvores localizadas nas áreas não atingidas. Em um cenário simulado em SIG, estimou-se que o fogo causou uma perda de 10% do volume total de madeira total do sistema, equivalente a 20,133 m^3 de eucalipto. Financeiramente, houve uma perda média de R$ 778,37 no cenário em que a madeira seria vendida para uma destinação simples como para a geração de energia.

Assim, os resultados apresentados indicam que o fogo causou danos significativos no sistema de produção ILPF Leite, afetando a taxa de crescimento e desenvolvimento das árvores e acarretando perda significativa na produção de madeira do sistema.

Por fim, os resultados obtidos ressaltaram a importância do geoprocessamento aplicado à agricultura de precisão no monitoramento de sistemas de produção agropecuários, possibilitando a coleta e análise de dados georreferenciados, a interpretação de resultados, o dimensionamento de danos e subsidiando a tomada de decisões para manejo do sistema integrado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA (TED nº. 21000.055745/2016-51 - CÓD. 241, e 21000.089244/2019-11 - CÓD. 325), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Embrapa (Projetos Rede Pecus, Rede AP e Carne Carbono Neutro), à Fapesp pelo suporte financeiro necessário à condução dos trabalhos experimentais. Esta pesquisa foi desenvolvida no âmbito do Projeto Rural Sustentável – Cerrado, fruto da parceria entre o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), o governo do Reino Unido, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) e a Rede ILPF e Embrapa.

REFERÊNCIAS

BÄR, A.; MICHALETZ, S. T.; MAYR, S. Fire effects on tree physiology. **The New Phytologist**, v. 223, n. 4, p. 1728-1741, 2019. DOI: http://doi.org/10.1111/nph.15871.

COCHRANE, M. A. Fire science for rainforests. **Nature**, v. 421, n. 6926, p. 913-919, 2003. DOI: http://doi.org/10.1038/nature01437.

FILIPPINI ALBA, J. M. Modelagem SIG em agricultura de precisão: conceitos, revisão e aplicações. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão:** resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 84-96.

GOLDAMMER, J. G. Forests on fire. **Science**, v. 284, n. 5421, p. 1782-1783, 1999. DOI: http://doi.org/10.1126/science.284.5421.1782a.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P.; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (ed.). **Agricultura de precisão:** resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 74-83.

HENLEY, S. **Nonparametric geostatistics**. New York: Springer Science & Business Media, 2012. 145 p.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Preço do Eucalipto**. São Paulo: IEA, 2018. Disponível em: https://www.noticiasagricolas.com.br/cotacoes/silvicultura/preco-eucalipto. Acesso em 10 de dez 2021.

JUÁREZ-OROZCO, S. M.; SIEBE, C.; FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, D. Causes and effects of forest fires in tropical rainforests: a bibliometric approach. **Tropical Conservation Science**, v. 10, 2017.

MIRANDA, M. I.; KLINK, C. A. Colonização de campo sujo de cerrado com diferentes regimes de queima pela gramínea Echinolaena inflexa (Poaceae). In: MIRANDA, H.S.; SAITO, C.H.; DIAS, B.F.S. (eds.) **Impactos de queimadas em áreas de Cerrado e de Restinga**. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 1996. p. 46-52.

OLIVEIRA, X. M.; OLIVEIRA, R. R.; RAMALHO, F. M. G.; CABACINHA, C. D.; ASSIS, A. L. Precisão e tempo de operação de alguns instrumentos para medir altura de árvores. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 18, p. 2336-2344, 2014.

REDIN, M.; SANTOS, G. F.; MIGUEL, P.; DENEGA, G. L.; LUPATINI, M.; DONEDA, A.; SOUZA, E. L. Impactos da queima sobre atributos químicos, físicos e biológicos do solo. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 381-392, 2011. DOI: http://doi.org/10.5902/198050983243.

TOMCZAK, M. Spatial interpolation and its uncertainty using automated anisotropic inverse distance weighting (IDW) - cross-validation/jackknife approach. **Journal of Geographic Information and Decision Analysis**, v. 2, n. 2, p. 18-30, 1998.

88

Variabilidade espacial dos atributos químicos de Latossolos do Cerrado: efeito do enleiramento e queima da madeira após supressão da vegetação nativa

Effect of Savanna windrow wood burning on the spatial variability of soil properties

Diogo Néia Eberhardt[1], Robélio Leandro Marchão[2], Pedro Rodolfo Siqueira Vendrame[3], Marc Corbeels[4], Osvaldo Guedes Filho[5], Eric Scopel[6], Thierry Becquer[7]

[1] *Engenheiro Agrônomo, Companhia Nacional de Abastecimento, Cuiabá (MT), Brasil, eberhardt.diogo@gmail.com*
[2] *Pesquisador, Embrapa Cerrados, Planaltina (DF), Brasil, robelio.marchao@embrapa.br*
[3] *Professor Associado, Universidade Estadual de Londrina, Londrina (PR), Brasil, vendrame@uel.br*
[4] *Pesquisador, CIRAD - La Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier, France, marc.corbeels@cirad.fr*
[5] *Professor Adjunto, Universidade Federal do Paraná, Jandaia do Sul (PR), Brasil, osvaldoguedes@yahoo.com.br*
[6] *Pesquisador, CIRAD - La Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier, France, eric.scopel@cirad.fr*
[7] *Pesquisador, Institut de Recherche pour le Développement, Montpellier, France, thierry.becquer@ird.fr*

RESUMO

As Savanas tropicais cobrem uma área de aproximadamente 2 bilhões de hectares ao redor do mundo, sendo essas regiões suscetíveis ao efeito do fogo tanto de origem antrópica quanto natural. No Brasil, historicamente a conversão das áreas de Cerrado se deu através da supressão da vegetação nativa e do uso do fogo para eliminação do material lenhoso. Objetivou-se avaliar a influência da queima de madeira proveniente do desmatamento do Cerrado na variabilidade espacial das propriedades químicas do solo, em campo. Os dados foram analisados utilizando-se métodos geoestatísticos. Os semivariogramas para pH (H_2O), pH ($CaCl_2$), Ca, Mg e K foram calculados de acordo com modelos esféricos, enquanto o fósforo apresentou efeito pepita puro. Os semivariogramas cruzados mostraram correlações entre pH (H_2O) e pH ($CaCl_2$) com outras variáveis com dependência espacial (Ca e Mg trocáveis e K disponível). Os mapas de variabilidade das concentrações de pH (H_2O), pH ($CaCl_2$), Ca, Mg e K também apresentaram padrões semelhantes de variabilidade espacial, indicando que a queima da vegetação após o desmatamento causou arranjo espacial bem definido. Mesmo após 20 anos de uso com agricultura, a distribuição espacial de pH (H_2O), pH ($CaCl_2$), Ca, Mg e K disponível foi afetada pela queima da madeira que ocorreu após enleiramento, durante a conversão da área.

Palavras-chave: incêndios florestais; mapeamento digital do solo; fertilidade do solo.

ABSTRACT

Tropical Savannas cover an area of approximately 2 billion hectares around the world and are subject to regular fires. This study aimed to evaluate the influence of burning windrow wood from Cerrado (Brazilian Savanna) deforestation on the spatial variability of soil chemical properties. The data were analyzed by using geostatistical methods. The semivariograms for pH (H_2O), pH ($CaCl_2$), Ca, Mg and K were calculated according to spherical models, whereas the phosphorus showed a nugget effect. The cross-semivariograms showed correlations between pH (H_2O) and pH ($CaCl_2$) with other variables with spatial dependence (exchangeable Ca and Mg and available K). The spatial variability maps for the pH (H_2O), pH ($CaCl_2$), Ca, Mg and K concentrations also showed similar patterns of spatial variability, indicating that burning the vegetation after deforestation caused a well-defined spatial arrangement. Even after 20 years of use with agriculture, the spatial distribution of pH (H_2O), pH ($CaCl_2$), Ca, Mg and available K was affected by the windrow wood burning that took place during the initial deforestation.

Keywords: wildfire; soil digital mapping; soil fertility.

https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000052

Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

As Savanas Tropicais cobrem uma área de cerca de 20 milhões de km^2 em todo o mundo (Young; Solbrig, 1993). O Cerrado brasileiro ocupa a região central do país e abrange cerca de 23% do território nacional, ou aproximadamente 2 milhões de km^2 (Beuchle et al., 2015). Sua vegetação nativa é composta por gramíneas de sub-bosque, com cobertura variável de arbustos e árvores. Os Latossolos são os solos mais comuns, cobrindo cerca de 45% da área do Cerrado. No bioma Cerrado, os incêndios ocorrem há milhares de anos por ação natural (provocados por raios), principalmente durante a estação seca (Nardoto; Bustamante, 2003; Pivello et al., 2010). Os incêndios naturais foram reconhecidos por sua importância ecológica, influenciando a ciclagem de nutrientes e afetando a dinâmica da vegetação, principalmente a relação grama/biomassa lenhosa (Nardoto et al., 2006). No entanto, o aumento das pressões populacionais e as mudanças no uso da terra promoveram tanto a intensidade do desmatamento quanto a frequência e gravidade dos incêndios antropogênicos (Lambin et al., 2003).

No Cerrado, o desmatamento para retirada da vegetação nativa para implantação das atividades agrícolas ocorreu tradicionalmente com o uso tratores pesados com lâminas frontais e frequentemente puxando correntes, sendo que nesse sistema a vegetação suprimida se concentrava em leiras ao longo do campo. O uso do fogo foi recorrente nessas áreas para a eliminação do material lenhoso, provocando um acúmulo de cinzas nas leiras. Como resultado, em grande parte da área desmatada o maquinário e as queimadas alteraram consideravelmente a camada superficial do solo (Chazdon, 2003). Embora muitos estudos sobre o efeito dos incêndios na savana tenham sido realizados, especialmente em relação à ecologia dessas áreas, poucas pesquisas examinaram os efeitos do fogo empregado durante a conversão das áreas nativas, especialmente sobre o comportamento dos nutrientes do solo (Lal; Ghuman, 1989; Fraser; Scott, 2011; Tavares Filho et al., 2011). Apesar de os efeitos da variabilidade espacial das propriedades do solo na produção agrícola serem um problema histórico, o correto manejo da variabilidade segue como um dos fatores determinantes para o sucesso das práticas de manejo relacionadas à agricultura de precisão (Frogbrook et al., 2002). A geoestatística (por exemplo, semivariogramas e interpolação espacial) tem sido utilizada como uma ferramenta importante e eficiente para caracterizar a variabilidade espacial das propriedades do solo. É também uma forma promissora de estudar a heterogeneidade das propriedades do solo após a conversão. Diante do exposto, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito do enleiramento e queima da madeira após o desmatamento, relacionando esta prática aos padrões de distribuição dos macronutrientes na camada superficial.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na região noroeste de Minas Gerais, no município de Unaí-MG (16º32'26" S, 46º50'44" W altitude 600 m). A região é caracterizada por clima tropical subúmido com precipitação e temperatura média de 1.200 mm e 24,4 ºC respectivamente. O solo da área é caracterizado como Latossolo Vermelho. A área foi desmatada 14 anos antes da instalação do experimento, no ano de 1991, seguindo as orientações da legislação ambiental vigente à época. A vegetação original era classificada como Cerradão, e a supressão da vegetação foi realizada utilizando tratores de esteira que, após a derrubada, promovia o enleiramento da vegetação em faixas equidistantes antes da queima. A sequência de culturas instalada na área teve início com o arroz de terras altas por três anos, seguido pela cultura do feijão por um ano, soja por dois anos e milho por 11 anos. Durante os cinco últimos anos antes da amostragem do solo, o milho foi cultivado em consórcio com plantas de cobertura (*Urochloa ruziziensis* – como gramínea, e *Cajanus cajan* – como leguminosa) sob dois sistemas de preparo do solo (plantio direto e convencional). Durante esse período, todas as parcelas do experimento receberam a mesma quantidade de fertilizantes distribuídos ao longo das linhas de plantio das culturas anuais, perfazendo um total de 230, 118 and 104 kg ha^{-1} de N, P e K, respectivamente. A área experimental foi de 6.000 m^2 com dimensões de 80 m x 75 m. Outras informações acerca da área experimental podem ser encontradas em Eberhardt et al. (2021a).

As amostras de solo foram coletadas em março de 2010, em um *grid* regular de 5 m x 5 m na camada de 0-20 cm, o que resultou em um total de 240 amostras. Optou-se pela amostragem na camada de 0-20 cm para evitar um possível efeito de estratificação na camada superficial nas áreas sob plantio direto. A análise de solo foi realizada em amostras de terra fina seca ao ar após peneiramento a 2 mm, seguindo a metodologia proposta pela Embrapa. Foram analisados o pH (H_2O e $CaCl_2$) teores de cálcio (Ca^{2+}) magnésio (Mg^{2+}) potássio (K^+) e fósforo (P). Uma análise descritiva dos dados foi realizada para avaliar medidas de dispersão e tendência dos dados. A normalidade foi testada através do teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de significância. O coeficiente de variação (CV) foi classificado através do critério de Warrick e Nielsen

(1980) como baixo (< 12%), médio (12% < CV < 60%) e alto (> 60%). A análise geoestatística foi realizada através do programa *Geostat*, e o cálculo dos semivariogramas baseado hipótese intrínseca de estacionariedade para avaliar a variabilidade espacial dos atributos (Vieira et al., 2002). As correlações espaciais entre as amostras foram analisadas através dos semivariogramas ajustados. Esta etapa foi realizada visando determinar a estrutura espacial e posterior obtenção dos parâmetros de entrada para interpolação utilizando krigagem ordinária. Modelos esféricos foram aplicados aos semivariogramas que apresentaram dependência espacial. O grau de dependência espacial foi avaliado através de metodologia proposta por Cambardella et al. (1994). Os mapas de variabilidade dos atributos foram gerados após análise dos semivariogramas utilizando interpolação por krigagem comum (Vieira, 2000) com auxílio do software Surfer 7.0, para delimitar as linhas de contorno. Semivariogramas cruzados foram utilizados para determinar se duas propriedades apresentavam uma variação comum (Goovaerts; Chiang, 1993).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos resultados da análise descritiva, observou-se que as medidas de tendência central (média e mediana) foram relativamente semelhantes para a maioria das variáveis. Os valores de pH (H_2O e $CaCl_2$) foram considerados baixos, Ca, Mg e K médios, e alto para P disponível, sendo que os valores de P e K não apresentaram distribuição normal. A Tabela 1 mostra os melhores modelos teóricos ajustados e os parâmetros estimados dos semivariogramas para os atributos químicos do solo. Dos modelos testados, o modelo esférico foi o melhor para prever a variabilidade espacial, exceto para P disponível, que exibiu um efeito pepita puro. O semivariogramas foram calculados de acordo com o modelo esférico para pH, K, LogK, Ca e Mg. Fósforo e LogP apresentaram efeito pepita puro. Exceto para P e LogP, todos os modelos apresentaram ajuste aos semivariogramas experimentais, com valores de coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,75 e, algumas vezes, próximo de 1 (pH, Ca e Mg). A transformação logarítmica não melhorou os coeficientes de determinação dos modelos para K e P. O P disponível mostrou um efeito pepita puro, podendo-se assumir nesse caso que a distribuição é completamente aleatória, sem dependência espacial entre as amostras.

Os valores de C_0 refletiram uma variabilidade não explicada pelos semivariogramas (Vieira, 2000) correspondendo a 0,05, 0,02, 0,07 e 0,07, respectivamente para pH (H_2O), pH ($CaCl_2$), Ca e Mg. Valores mais baixos de C_0 foram encontrados para pH (H_2O), pH ($CaCl_2$), Ca e Mg, indicando uma maior continuidade quando comparado ao valor de C_0 para o K disponível. A análise da relação $C_0/(C_0 + C_1)$ permite quantificar o componente aleatório (C_0) dentro da variância total ($C_0 + C_1$) e corresponde ao grau de dependência espacial (DSD). Um moderado grau de dependência espacial (25% < DSD < 75%) foi observado para pH (H_2O), pH ($CaCl_2$) e Mg, enquanto K e Ca apresentaram um forte grau de dependência (DSD < 25%). O alcance (R) é a distância na qual a autocorrelação espacial entre pares de pontos de dados cessa. Sua variação entre 21 m e 36 m indica que a distância da autocorrelação espacial é maior do que a distância média de 5 m entre amostras, o que permite concluir que a abordagem utilizada foi adequada para representar a estrutura

Tabela 1. Modelos teóricos e parâmetros estimados dos semivariogramas para os atributos químicos avaliados.

Variável	Modelo	Parâmetros					Classe
		C_0	C_1	R (m)	R^2	DSD (%)	
pH_{H2O}	Esférico	0.0491	0.0467	35.91	0.771	51.25	Moderada
pH_{CaCl2}	Esférico	0.0154	0.0247	35.15	0.995	38.37	Moderada
P	Efeito pepita	27.61	29719	556942	0.461	-	-
LogP	Efeito pepita	0.064	0.026	41	0.414	-	-
K	Esférico	1948.4	7481	23.46	0.852	20.66	Forte
LogK	Esférico	0.005	0.013	25	0.837	27.78	Moderada
Ca	Esférico	0.0662	0.2342	20.99	0.996	22.02	Forte
Mg	Esférico	0.0731	0.0896	28.74	0.996	44.95	Moderada

C_0: efeito pepita; C_1: baseline; R: alcance; R^2: coeficiente de determinação; DSD: grau de dependência espacial.

espacial, o que permite obter mapas de interpolação com alta qualidade (McGrath et al., 2004). Os semivariogramas cruzados ajustados ao modelo esférico para os pares de variáveis pH (H_2O), pH ($CaCl_2$), Ca, Mg e K estão apresentados na Tabela 2. Todos eles mostraram um grau forte ou moderado de dependência espacial com alcances semelhantes, variando de 20 m a 35 m, com média de 27 m.

O padrão de distribuição espacial dos atributos químicos do solo foi avaliado pelos mapas estimados por krigagem (Figura 1). Os mapas de contorno revelaram padrões semelhantes com uma zona irregular cruzando toda a área de estudo, onde os valores de todos os atributos químicos foram maiores. Os padrões apresentados nos mapas sugerem maiores concentrações dos atributos avaliados na área que começa na parte central superior seguindo até a parte inferior esquerda do mapa (oeste para leste), revelando claramente um padrão contínuo representado por uma faixa de maior concentração.

Tabela 2. Modelos teóricos e estimativa dos parâmetros dos semivariogramas cruzados para os atributos químicos avaliados.

Pares de variáveis	Modelo	Parâmetros					Classe
		C_0	C_1	R (m)	R^2	DSD (%)	
Ca x Mg	Esférico	0.035	0.150	20	0.783	18.9	Forte
Ca x pH_{CaCl2}	Esférico	0.015	0.060	25	0.787	20.0	Forte
Mg x pH_{CaCl2}	Esférico	0.022	0.045	30	0.791	32.8	Moderada
K x pH_{CaCl2}	Esférico	0.000	7.100	26	0.507	0.0	Forte
pH_{H2O} x pH_{CaCl2}	Esférico	0.020	0.031	35	0.791	39.2	Moderada
pH_{H2O} x Ca	Esférico	0.021	0.068	25	0.686	23.6	Forte
pH_{H2O} x Mg	Esférico	0.021	0.060	30	0.756	25.9	Moderada
pH_{H2O} x K	Esférico	0.000	12.000	24	0.633	0.0	Forte

C_0: efeito pepita; C_1: baseline; R: alcance; R^2: coeficiente de determinação; DSD: grau de dependência espacial.

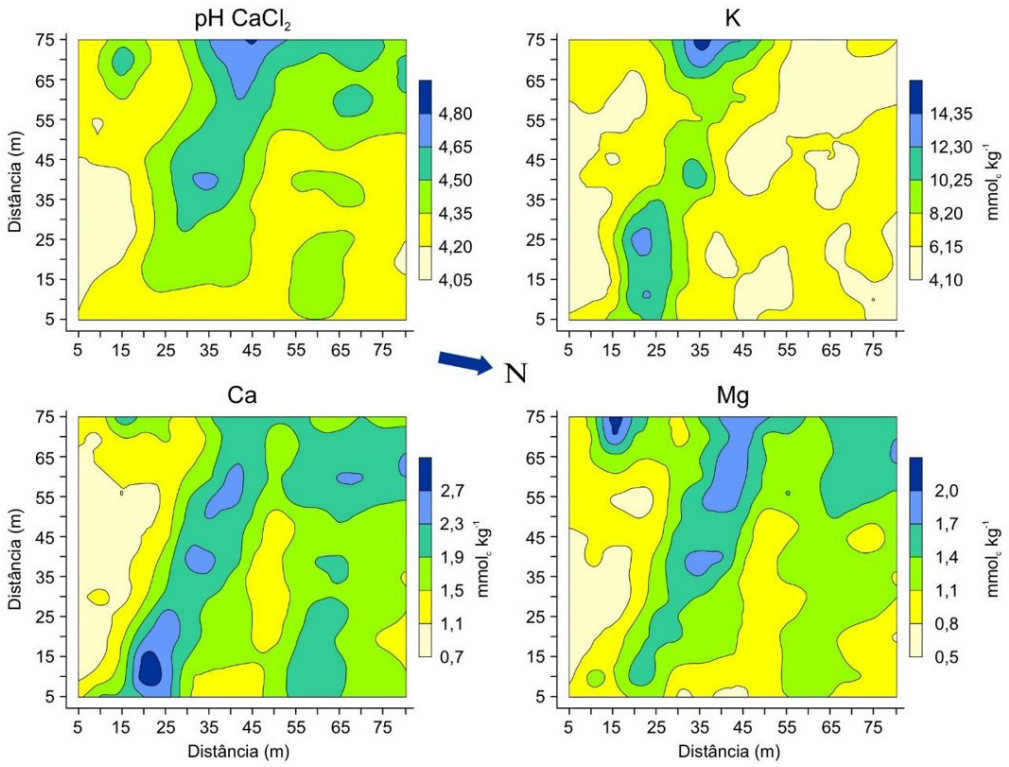


Figura 1. Mapas de contorno dos atributos químicos do solo do local de estudo estimados por krigagem.

Considerando o histórico da área, os resultados sugerem que esta zona irregular deve estar relacionada com a queima da madeira enleirada proveniente do desmatamento do Cerrado, prática comum utilizada na área experimental. Durante a queima da vegetação, principalmente do material lenhoso, parte dos nutrientes são depositados no solo como cinzas, e outros, como o nitrogênio, são liberados na atmosfera como compostos gasosos (Pivello; Coutinho, 1992). Cabe ressaltar que a biomassa aérea em diferentes fitofisionomias do Cerrado pode variar entre 5 e 25 Mg ha^{-1} (Delitti et al., 2006) e a concentração de nutrientes entre 0,56% e 1,38% para Ca, 0,08% e 0,10% para Mg, 0,19% e 2,26% para K e 0,11% e 0,6% para P (Pivello; Coutinho, 1992, Kauffman et al., 1994).

Na região do Cerrado, onde o estudo foi conduzido, o fogo desempenha um papel crítico nos ciclos biogeoquímicos do solo (Pivello et al., 2010). As alterações nesses processos são diversas e a principal mudança está relacionada com as concentrações de nutrientes do solo (Lal; Ghuman, 1989, Fraser; Scott, 2011). No presente estudo, a concentração atípica de nutrientes revelada pelos mapas após 20 anos do desmatamento mostra que esse efeito é duradouro, sendo determinante da variabilidade espacial mesmo após vários ciclos de cultivo. Deve-se considerar que as alterações nos atributos químicos do solo (pH, cátions trocáveis) resultam principalmente da quantidade de cinzas com alta alcalinidade adicionada aos solos, que promove um desbalanço entre a quantidade de cátions em relação aos ânions inorgânicos que são abundantes no material vegetal (Noble et al., 1996). Outros estudos também mostraram incrementos nas concentrações de Ca e Mg no solo após o fogo ou deposição de cinzas (Strømmgaard, 1992; Kauffman et al., 1994). Nessas condições, o pH do solo também tende a aumentar após um incêndio, devido à liberação de íons básicos provenientes das cinzas (Nardoto; Bustamante, 2003).

Dentre os atributos químicos avaliados, o único que não apresentou o mesmo padrão espacial dos demais foi o P disponível, que demonstrou efeito pepita puro, indicando uma total falta de dependência espacial. A alta variabilidade deste nutriente está provavelmente relacionada à aplicação na linha das culturas anuais, não sendo este efeito contemplado na amostragem de solo, uma vez que as práticas de manejo relacionadas ao modo de aplicação do fertilizante podem ter grande efeito na disponibilidade do P (Eberhardt et al., 2021b).

4 CONCLUSÕES

Os mapas de contorno propostos foram capazes de identificar, mesmo após duas décadas de cultivo, a variabilidade espacial proporcionada pelo efeito do enleiramento e da queima da vegetação após a conversão da vegetação nativa. Considerando que o uso do fogo ainda é prática comum nas regiões de expansão da fronteira agrícola, as informações aqui apresentadas podem ser utilizadas na tomada de decisão no manejo do solo, por exemplo, para definir a estratégia de mapeamento da variabilidade do solo em zonas de manejo para agricultura de precisão.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa, CIRAD, CNPq.

REFERÊNCIAS

BEUCHLE, R.; GRECCHI, R. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SELIGER, R.; EVA, H. D.; SANO, E.; ACHARD, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography (Sevenoaks, England)**, v. *58*, n. 1, p. 116-127, 2015. DOI: http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.01.017.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. *58*, n. 5, p. 1501-1511, 1994. DOI: http://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x.

CHAZDON, R.L. Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. *6*, n. 1-2, p. 51-71, 2003. DOI: http://doi.org/10.1078/1433-8319-00042.

DELITTI, W. B. C.; MEGURO, M.; PAUSAS, J. G. Biomass and mineral mass estimates in a "Cerrado" ecosystem. **Revista Brasileira de Botanica. Brazilian Journal of Botany**, v. *29*, n. 4, p. 531-540, 2006. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-84042006000400003.

EBERHARDT, D. N.; MARCHÃO, R. L.; VENDRAME, P. R. S.; CORBEELS, M.; GUEDES FILHO, O.; SCOPEL, E.; BECQUER, T. Effect of Savanna windrow wood burning on the spatial variability of soil properties. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. *51*, p. e66853, 2021a. DOI: http://doi.org/10.1590/1983-40632021v5166853.

EBERHARDT, D. N.; MARCHÃO, R.; QUIQUAMPOIX, H.; LE GUERNEVÉ, C.; RAMAROSON, V.; SAUVADET, M.; MURAOKA, T.; BECQUER, T. Effects of companion crops and tillage on soil phosphorus in a Brazilian Oxisol: a chemical and 31P NMR spectroscopy study. **Journal of Soils and Sediments**, v. *21*, n. 2, p. 1024-1037, 2021b. DOI: http://doi.org/10.1007/s11368-020-02817-7.

FRASER, M.A.; SCOTT, B.J.. Variability of acidity in agricultural soils: the impact of timber burning at land clearing. **Soil Research (Collingwood, Vic.)**, v. *49*, n. 3, p. 223-230, 2011. DOI: http://doi.org/10.1071/SR10076.

FROGBROOK, Z .L.; OLIVER, M. A.; SALAHI, M.; ELLIS, R. H. Exploring the spatial relations between cereal yield and soil chemical properties and the implications for sampling. **Soil Use and Management**, v. *18*, n. 1, p. 1-9, 2002. DOI: http://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00043.x.

GOOVAERTS, P.; CHIANG, C. N. Temporal persistence of spatial patterns for mineralizable nitrogen and selected soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. *57*, n. 2, p. 372-381, 1993. DOI: http://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700020015x.

KAUFFMAN, J. B.; CUMMINGS, D. L.; WARD, D. E. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian Cerrado. **Journal of Ecology**, v. *82*, n. 3, p. 519-531, 1994. DOI: http://doi.org/10.2307/2261261.

LAL, R.; GHUMAN, B. S. Biomass burning in windrows after clearing a tropical rainforest: effects on soil properties, evaporation and crop yields. **Field Crops Research**, v. *22*, n. 4, p. 247-255, 1989. DOI: http://doi.org/10.1016/0378-4290(89)90025-7.

LAMBIN, E. F.; GEIST, H. J.; LEPERS, E. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. **Annual Review of Environment and Resources**, v. *28*, n. 1, p. 205-241, 2003. DOI: http://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459.

MCGRATH, D.; ZHANG, C.; CARTON, O. T. Geostatistical analyses and hazard assessment on soillead in silver mines area, Ireland. **Environmental Pollution**, v. *127*, n. 2, p. 239-248, 2004. DOI: http://doi.org/10.1016/j.envpol.2003.07.002.

NARDOTO, G. B.; BUSTAMANTE, M. M. C. Effects of fire on soil nitrogen dynamics and microbial biomass in Savannas of Central Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. *38*, n. 8, p. 955-962, 2003. DOI: http://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000800008.

NARDOTO, G. B.; CUNHA BUSTAMANTE, M. M.; PINTO, A. S.; KLINK, C. A. Nutrient use efficiency at ecosystem and species level in Savanna areas of Central Brazil and impacts of fire. **Journal of Tropical Ecology**, v. *22*, n. 2, p. 191-201, 2006. DOI: http://doi.org/10.1017/S0266467405002865.

NOBLE, A. D.; ZENNECK, I.; RANDALL, P. J. Leaf litter ash alkalinity and neutralisation of soil acidity. **Plant and Soil**, v. *179*, n. 2, p. 293-302, 1996. DOI: http://doi.org/10.1007/BF00009340.

PIVELLO, V. R.; COUTINHO, L. M. Transfer of macro-nutrients to the atmosphere during experimental burnings in an open Cerrado (Brazilian Savanna). **Journal of Tropical Ecology**, v. *8*, n. 4, p. 487-497, 1992. DOI: http://doi.org/10.1017/S0266467400006829.

PIVELLO, V. R.; OLIVERAS, I.; MIRANDA, H. S.; HARIDASAN, M.; SATO, M. N.; MEIRELLES, S. T. Effect of fires on soil nutrient availability in an open Savanna in Central Brazil. **Plant and Soil**, v. *337*, n. 1-2, p. 111-123, 2010. DOI: http://doi.org/10.1007/s11104-010-0508-x.

STRØMMGAARD, P. Immediate and long-term effects of fire and ash fertilization on a Zambian miombo woodland soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. *41*, n. 1, p. 19-37, 1992. DOI: http://doi.org/10.1016/0167--8809(92)90177-D.

TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, R. M.; FERREIRA, V. M. Soils chemical fertility in pastures formed by native species and Brachiaria decumbens managed with annual fire. **Semina: Ciências Agrárias**, v. *32*, n. 4, p. 1771-1782, 2011. DOI: http://doi.org/10.5433/1679-0359.2011v32n4Sup1p1771.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

VIEIRA, S. R., MILLETE, J.; TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. p. 1-45.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344. DOI: http://doi.org/10.1016/B978-0-12-348580-9.50018-3.

YOUNG, M. D.; SOLBRIG, O. T. **The world's savannas***: economic driving forces, ecological constraints and policy options for sustainable land use.* Paris: Unesco and Parthenon Publishing Group, 1993.

Câmara Temática de
AGRICULTURA
DIGITAL
Iniciativa Rede ILPF

OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

Publicação em Parceria com a

redeILPF

Associadas Rede ILPF

Embrapa bradesco cocamar JOHN DEERE

minerva foods SOESP Sementes Oeste Paulista suzano syngenta Timac AGRO

ISBN 9786586819380