

OBJETIVOS DE  
DESENVOLVIMENTO  
SUSTENTÁVEL



# AGRICULTURA & MEIO AMBIENTE

A BUSCA PELA SUSTENTABILIDADE

*Marcelo Augusto Boechat Morandi • Ana Paula Contador Packer • Rodrigo Mendes  
Janaína Paula Marques Tanure • Cristiano Alberto de Andrade • Cristiano Menezes*

Editores Técnicos

**Embrapa**

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Meio Ambiente  
Ministério da Agricultura e Pecuária*

# **AGRICULTURA & MEIO AMBIENTE**

## A BUSCA PELA SUSTENTABILIDADE

**Marcelo Augusto Boechat Morandi  
Ana Paula Contador Packer  
Rodrigo Mendes  
Janaína Paula Marques Tanure  
Cristiano Alberto de Andrade  
Cristiano Menezes**

Editores Técnicos

**Embrapa**  
Brasília, DF  
2024

Embrapa  
Parque Estação Biológica  
Av. W3 Norte (final)  
70770-901 Brasília, DF  
www.embrapa.br  
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

**Responsável pelo conteúdo e editoração**  
Embrapa Meio Ambiente  
Rodovia SP 340, Km 127,5  
Tanquinho Velho - Jaguariúna, SP - CEP 13918-110  
www.embrapa.br/meio-ambiente

Comitê Local de Publicações  
Presidente: *Janaina Paula Marques Tanure*  
Secretário Executivo: *Anderson Soares Pereira*

Membros: *Robson Rolland Monticelli Barizon, Aline Telles Biasoto Marques, Alfredo José Barreto Luiz, Marcos Eliseu Losekann, Maria Cristina Tordin, Maria de Cléofas Faggion Alencar, Nilce Chaves Gattaz, Priscila de Oliveira, Sonia Claudia do Nascimento de Queiroz e Victor Paulo Marques Simão*

Revisão de texto: *Reinaldo Rodrigues, Nilce Chaves Gattaz e Eliana de Souza Lima*  
Normalização bibliográfica: *Victor Paulo Marques Simão e Maria de Cléofas Faggion Alencar*

Capa e projeto gráfico: *Paulo Eduardo Marchezini*

Editoração eletrônica: *Paulo Eduardo Marchezini*

Imagem de capa elaborada com fusão de fotos dos autores: *Lilian Alves; L. C. Jaques e Felipe Santos da Rosa*

1ª edição

Publicação digitalizada (2024): PDF

**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)**  
Embrapa Meio Ambiente

---

Agricultura & meio ambiente: a busca pela sustentabilidade / Marcelo Augusto Boechat Morandi ... [et al.], editores técnicos. -- Brasília, DF : Embrapa, 2024.

PDF (1010 p.) : il. color.

ISBN 978-65-5467-054-8

1. Cana-de-açúcar. 2. Adequação agroambiental. 3. Biocarvão e biossólidos. 4. Sistemas agroflorestais agroecológicos. 5. Morango. 6. Conservação do solo e água. 7. Monitoramento ambiental. 8. Abelhas-sem-ferrão. 9. Sistemas agroalimentares. 10. Avaliação do ciclo de vida. 11. Indicadores de sustentabilidade. 12. Bioindicadores. 13. Monitoramento hidrológico. 14. Avaliação ecotoxicológica. 15. Resíduos e contaminantes. 16. Bioprospecção de microrganismos. 17. Controle biológico de plantas. 18. Serviços quarentenários. 19. Microbioma da rizosfera. 20. Bioinsumos. 21. OGM. 22. Agenda 2030. 23. Mudança climática e doenças e pragas. 24. Mudança climática e problemas fitossanitários. 25. Gases de efeito estufa. 26. Inventários GEE. 27. Agricultura de baixo carbono. 28. Políticas públicas. I. Morandi, M. A. B. II. Packer, A. P. C. III. Mendes, R. IV. Tanure, J. P. M. V. Andrade, C. A. de. VI. Menezes, C.

CDD (21. ed.) 363.7

"O futuro não é um lugar onde estamos indo, mas um lugar que estamos criando. O caminho para ele não é encontrado, mas construído e o ato de fazê-lo muda tanto o realizador quanto o destino"

*John Schaar*



# AUTORES

## **Adriana Marlene Moreno Pires**

Engenheira-agrônoma, doutora em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisadora da Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, MS

## **Alejandro Mario Rago**

Engenheiro-agrônomo, mestre em Fitopatologia, diretor nacional de pesquisa e desenvolvimento do Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina

## **Alexandre Ortega Gonçalves**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

## **Alfredo José Barreto Luiz**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Sensoriamento Remoto, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

## **Alice Watte Schwingel**

Zootecnista, doutora em Agronomia, bolsista na Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, MS

## **Aline Peregrina Puga**

Engenheira-agrônoma, doutora em Agricultura Tropical e Subtropical, especialista agrônômica da Mosaic Fertilizantes, Campinas, SP

## **Ana Carolina Martins de Queiroz**

Bióloga, mestre em Zoologia, analista da Embrapa Ambiente, Jaguariúna, SP

## **Ana Lúcia Penteado**

Farmacêutica, doutora em Tecnologia de Alimentos, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Ana Maria Cirino Ruocco**

Bióloga, doutora em Zoologia, profissional autônoma, Botucatu, SP

**Ana Paula Contador Packer**

Engenheira-agrônoma, doutora em Química Analítica, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Anderson Soares Pereira**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Irrigação e Drenagem, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**André Nepomuceno Dusi**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Virologia, pesquisador da Embrapa lotado no Departamento de Gestão Corporativa - DEGES da Secretaria de Defesa Agropecuária - SDA, do Ministério da Agricultura e Pecuária, Brasília, DF

**André May**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Produção Vegetal, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Anna Leticia Montenegro Turtelli Pighinelli**

Engenheira agrícola, doutora em Engenharia Agrícola, analista da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Antonio Dias Santiago**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Unidade de Execução de Pesquisa de Rio Largo (UEP - Rio Largo) da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Rio Largo, AL

**Antonio Luiz Cerdeira**

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Bioquímica, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Artur Jordão de Magalhães Rosa**

Zootecnista, doutor em Genética, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

**Augusto Guerreiro Fontoura Costa**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Algodão, Campina Grande, PB

**Beatriz de Aguiar Giordano Paranhos**

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciências Biológicas, pesquisadora da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

**Bernardo de Almeida Halfeld-Vieira**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitopatologia, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Célia Maria Doria Frasca-Scorvo**

Zootecnista, mestre em Aquicultura, pesquisadora da Agência Paulista de Tecnologias dos Agronegócios da Secretaria de Agricultura e Abastecimento de São Paulo, Monte Alegre do Sul, SP

**Celso Vainer Manzatto**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Produção Vegetal, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Claudio César de Almeida Buschinelli**

Ecólogo, doutor em Geografia, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Claudio Martín Jonsson**

Farmacêutico, doutor em Biologia Funcional e Molecular, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Cristiano Alberto de Andrade**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Cristiano Campos Mattioli**

Zootecnista, doutor em Zootecnia, bolsista no Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, AM

**Cristiano Menezes**

Biólogo, doutor em Entomologia, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Daniel Gomes dos S. W. Loebmann**

Geógrafo, mestre em Geografia, analista da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Daniel Terao**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitopatologia, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Daniela Maciel Pinto**

Bibliotecária, mestre em Ciência da Informação, analista da Embrapa Territorial, Campinas, SP

**Danilo Tosta Souza**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Microbiologia Agrícola, bolsista na Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Debora Renata Cassoli de Souza Dutra**

Química, doutora em Química Analítica, analista da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Deise Maria Fontana Capalbo**

Engenheira de alimentos, doutora em Engenharia de Alimentos, pesquisadora aposentada da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Edson Watanabe (in memoriam)**

Engenheiro de alimentos, Ph.D. em Ciência dos Alimentos, pesquisador da Embrapa Agroindústria de Alimentos, Rio de Janeiro, RJ

**Eliana Maria Gouveia Fontes**

Bióloga, Ph.D. em Entomologia, pesquisadora da Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, Brasília, DF

**Elisangeles Baptista de Souza**

Engenheira-agrônoma, especialista em Gestão Rural e Agroindustrial, assessora técnica da Federação da Agricultura do Estado do Paraná (FAEP), Curitiba, PR

**Emília Hamada**

Engenheira agrícola, doutora em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Eunice Reis Batista**

Bióloga, doutora em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Everton Santos Dias**

Biólogo, doutor em Entomologia, professor da Faculdade SESI-SP de Educação, São Paulo, SP

**Fagoni Fayer Calegario**

Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Fernanda Garcia Sampaio**

Zootecnista, doutora em Ciências Fisiológicas, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Fernando Dini Andreote**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Genética e Melhoramento de Plantas, professor titular da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP

**Fernando Henrique Cardoso**

Engenheiro químico, mestre em modelagem e simulação de processos, bolsista na Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Francisco Miguel Corrales**

Engenheiro-agrônomo, mestre em Ciência Ambiental, analista da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Francislene Angelotti**

Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, pesquisadora da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE

**Gabriel Moura Mascarin**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Entomologia, analista da Embrapa Ambiente, Jaguariúna, SP

**Geraldo Stachetti Rodrigues**

Ecólogo, Ph.D. em Ecologia e Biologia Evolutiva, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Gilberto José de Moraes**

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Entomologia, professor aposentado da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP

**Gileno Lacerda Vieira Junior**

Biólogo, doutor em Genética de Microrganismos, bolsista na Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Gustavo Bayma**

Geógrafo, mestre em Sensoriamento Remoto, analista da Embrapa Ambiente, Jaguariúna, SP

**Hamilton Hisano**

Zootecnista, doutor em Zootecnia, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Helber Custódio de Freitas**

Meteorologista, doutor em Ecologia Aplicada, professor assistente doutor da Faculdade de Ciências de Bauru - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bauru, SP

**Herbert Cavalcante de Lima**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência dos Alimentos, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, SP

**Hugo Henrique Lanzi Saulino**

Biólogo, doutor em Ecologia e Recursos Naturais, bolsista na Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP

**Humberto Ribeiro da Rocha**

Engenheiro civil-aeronáutico, doutor em Meteorologia, professor titular do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP

**Inácio de Barros**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Gado de Leite, Juiz de Fora, MG

**Itamar Soares de Melo**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Janaína Paula Marques Tanure**

Bióloga, mestre em Genética e Melhoramento, analista da Embrapa Ambiente, Jaguariúna, SP

**Jeanne Scardini Marinho-Prado**

Engenheira-agrônoma, doutora em Entomologia, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**João Carlos Canuto**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agroecologia, pesquisador aposentado da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**João Donato Scorvo Filho**

Zootecnista, doutor em Aquicultura, pesquisador aposentado da Agência Paulista de Tecnologias dos Agronegócios da Secretaria de Agricultura e Abastecimento de São Paulo, Monte Alegre do Sul, SP

**João Manoel Cordeiro Alves**

Zootecnista, mestre em Aquicultura, consultor em aquicultura na aquabusiness consulting Ltda, Jaboticabal, SP

**João Roberto Correia**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Alimentos e Territórios, Maceió, AL

**Joel Leandro de Queiroga**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Meio Ambiente e Desenvolvimento, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Jordana Alves Ferreira**

Química, doutora em Ciências, bolsista na Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**José Felipe Ribeiro**

Biólogo, Ph.D. em Ecologia, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

**Josiane Barros Chiaramonte**

Bióloga, doutora em Microbiologia Agrícola, gerente de pesquisa, desenvolvimento e inovação da Vittia S.A., São Joaquim da Barra, SP

**Josias Correa de Faria**

Engenheiro-agrônomo, Ph.D. em Fitopatologia, pesquisador da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás, GO

**Josilaine Taeco Kobayashi**

Bióloga, mestre em Ecologia, auditora ambiental da AECOM do Brasil Ltda, Belo Horizonte, MG

**Juliane Fontana Koba**

Química, doutora em Engenharia Química, analista da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Julio Ferraz de Queiroz**

Oceanólogo, doutor em Ciências Agrárias, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Kathia Cristhina Sonoda**

Bióloga, doutora em Ecologia de Agroecossistemas, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Kátia de Lima Nechet**

Engenheira-agrônoma, doutora em Fitopatologia, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Kátia Regiane Brunelli**

Engenheira-agrônoma, doutora em Fitopatologia, pesquisadora da Sakata Seed Sudamerica, Bragança Paulista, SP

**Kátia Sampaio Malagodi-Braga**

Bióloga, doutora em Ciências, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Ladislau Araújo Skorupa**

Engenheiro florestal, doutor em Ciências Biológicas, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Lauro Charlet Pereira**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Planejamento Rural Sustentável, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Letícia Sayuri Shiroma Franco**

Química, mestre em Química Analítica, bolsista na Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Lilian Simara Abreu Soares Costa**

Engenheira-agrônoma, doutora em Fitopatologia, bolsista na Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Lucas William Mendes**

Biólogo, doutor em Ciências, professor doutor do Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP

**Luciano Lourenço Nass**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Lucimar Santiago de Abreu**

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciências Sociais, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Luiz Octávio Ramos Filho**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agroecologia, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Magda Aparecida de Lima**

Ecóloga, doutora em Geociências, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Maike Rossmann**

Bióloga, doutora em Engenharia Agrícola, bolsista no Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP

**Marcelo Augusto Boechat Morandi**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitopatologia, pesquisador, Chefe da Assessoria de Relações Internacionais da Embrapa, Brasília, DF

**Marcelo Gomes da Silva**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Geofísica Espacial, pesquisador assistente na Universidade do Texas Rio Grande Valley, McAllen/Texas, EUA

**Márcia Mayumi Ishikawa**

Médica-veterinária, doutora em Parasitologia Veterinária, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Marcia Regina Assalin**

Química, doutora em Ciências, analista da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Marco Antonio Ferreira Gomes**

Geólogo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Marcos Antonio Vieira Ligo**

Ecólogo, doutor em Ciências, pesquisador aposentado da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Marcos Corrêa Neves**

Engenheiro-eletricista, doutor em Sensoriamento Remoto, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Marcos Eliseu Losekann**

Zootecnista, mestre em Zootecnia, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Maria Conceição Peres Young Pessoa**

Matemática Aplicada, doutora em Engenharia Elétrica, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Maria de Cléofas Faggion Alencar**

Bibliotecaria, doutora em Educação, analista da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Maria José Amstalden Moraes Sampaio**

Engenheira-agrônoma, Ph.D. em Bioquímica Molecular, pesquisadora da Assessoria de Relações Internacionais da Embrapa, Brasília, DF

**Maria Lucia Zuccari**

Bióloga, doutora em Agronomia, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Mariana Silveira Guerra Moura e Silva**

Bióloga, doutora em Engenharia Agrícola, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Mariangela Hungria**

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Soja, Londrina, PR

**Marília Ieda da Silveira Folegatti**

Zootecnista, doutora em Tecnologia de Alimentos, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Marília Regini Nuti**

Engenheira de alimentos, mestre em Ciência dos Alimentos, pesquisadora da Embrapa Agroindústria de Alimentos, Rio de Janeiro, RJ

**Mário Artemio Urchei**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Mônica Cibele Amancio**

Advogada, doutora em Ciências Genômicas e Biotecnologia, analista da Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, Brasília, DF

**Myrian Suely Teixeira Alves dos Santos Ramos**

Engenheira-agrônoma, mestre em Educação Social e Animação Sociocultural, analista da Embrapa Ambiente, Jaguariúna, SP

**Natalia Crespo Mendes**

Química, doutora em Avaliação de Ciclo de Vida, bolsista na Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Nilza Patrícia Ramos**

Engenheira-agrônoma, doutora em Fitotecnia, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Oswaldo Machado Rodrigues Cabral**

Meteorologista, doutor em Meteorologia, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Paulo Ernesto Meissner Filho**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitopatologia, pesquisador da Embrapa Mandioca e Fruticultura, Cruz das Almas, BA

**Pedro Gerhard**

Biólogo, doutor em Ecologia de Agroecossistemas, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Priscila de Oliveira**

Engenheira-agrônoma, doutora em Fitotecnia, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Rafael Mingoti**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Irrigação e Drenagem, analista da Embrapa Territorial, Campinas, SP

**Rafaele Fernandes Zanesco**

Bióloga, especialista em Gestão Estratégica da Qualidade, analista de qualidade pleno na Eurofins Agrosience Services, Indaiatuba, SP

**Raffaella Rossetto**

Engenheira-agrônoma, doutora em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisadora do Instituto Agronômico de Campinas, Centro Avançado de Pesquisa Tecnológica do Agronegócio de Cana, Jaú, SP

**Renan Milagres Lage Novaes**

Biólogo, especialista em Gestão de Projetos, analista da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Renata Ribeiro do Valle Gonçalves**

Engenheira cartógrafa, doutora em Engenharia Agrícola, pesquisadora do Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP

**Renato Berlim Fonseca**

Desenhista industrial, mestre em Educação, analista da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF

**Ricardo Borghesi**

Zootecnista, doutor em Ciência Animal e Pastagens, pesquisador da Diretoria Executiva de Negócios da Embrapa, Brasília, DF

**Ricardo Costa Rodrigues de Camargo**

Biólogo, doutor em Zootecnia, Nutrição e Produção Animal/Apicultura, pesquisador da Embrapa Meio-Norte, Teresina, PI

**Ricardo de Oliveira Figueiredo**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Biotecnologia e Biotecnologia, pesquisador aposentado da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Rita de Cássia Lourenço**

Engenheira-agrônoma, mestre em Saúde Pública, auditora fiscal federal agropecuária do Ministério da Agricultura e Pecuária, Campinas, SP

**Roberto Manolio Valladão Flores**

Economista, Ph.D. em Economia Agrícola, pesquisador da Embrapa Pesca e Aquicultura, Palmas, TO

**Robson Rolland Monticelli Barizon**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Rodrigo Mendes**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Genética e Melhoramento de Plantas, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Rosana Faria Vieira**

Engenheira-agrônoma, doutora em Microbiologia do Solo, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Ruan Carnier**

Engenheiro Ambiental e Sanitarista, doutor em Agricultura Tropical e Subtropical, bolsista na Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Sandra Furlan Nogueira**

Engenheira-agrônoma, doutora em Química na Agricultura e no Ambiente, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Sandro Eduardo Marschhausen Pereira**

Engenheiro civil, doutor em Ciências, analista da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Santiago Vianna Cuadra**

Meteorologista, doutor em Meteorologia Aplicada, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

**Sergio de Oliveira Procópio**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitotecnia, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Simone de Souza Prado**

Engenheira-agrônoma, Ph.D. em Entomologia, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Sonia Cláudia do Nascimento de Queiroz**

Química, doutora em Ciências, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Valéria Sucena Hammes**

Engenheira-agrônoma, doutora em Planejamento Ambiental, pesquisadora aposentada da Embrapa, Brasília, DF

**Vanessa Nessner Kavamura Noguchi**

Bióloga, doutora em Microbiologia Agrícola, pesquisadora do Rothamsted Research, Harpenden, Reino Unido

**Vera Lúcia Ferracini**

Química, doutora em Ciências, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Vera Lucia Scherholz S. de Castro**

Médica-veterinária, doutora em Patologia Experimental e Comparada, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Victor Paulo Marques Simão**

Bibliotecário, analista da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Vinícius Gonçalves Maciel**

Químico industrial, doutor em Engenharia e Tecnologia de Materiais, consultor na Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Wagner Bettiol**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Fitopatologia, pesquisador da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**Waldemore Moriconi**

Bacharel em direito, especialista em Direito Ambiental, analista da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP

**William Viveiros**

Biólogo, mestre em Ciências, gerente do setor de ecotoxicologia aquática e auditor do sistema de gestão da qualidade da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, São Paulo, SP

# APRESENTAÇÃO

Com a projeção da população mundial atingindo a marca de 10 bilhões de pessoas nas próximas décadas, a pressão sobre os recursos naturais e a demanda por alimentos aumentam exponencialmente. Este cenário impõe uma série de desafios complexos, multifacetados e interconectados que devem ser enfrentados de forma urgente e abrangente. Estes desafios incluem a necessidade de aumentar a produção de alimentos de forma sustentável, usar fontes energéticas renováveis e de baixa emissão de gases de efeito estufa e preservar a biodiversidade e funcionalidade dos ecossistemas.

Neste cenário, a ciência tem construído caminhos para viabilizar tecnologias inovadoras que garantam a transformação dos sistemas agroalimentares de forma sustentável, equitativa e justa. Princípios amplos e globais para esta transformação estão presentes na Agenda 2030 das Nações Unidas, com seus 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), e cabe à pesquisa científica promover os avanços necessários para adequar as soluções aos contextos específicos de cada região e bioma. A Embrapa Meio Ambiente e seus parceiros têm feito isso há mais de 40 anos, promovendo o conhecimento e o desenvolvimento de tecnologias para a agricultura tropical, levando em conta seus impactos sociais, econômicos e ambientais.

A Embrapa Meio Ambiente nasceu em 1982 com a missão de integrar a produção agropecuária com a sustentabilidade em todas as suas dimensões. Esta missão foi ampliada e fortalecida durante a ECO 92 no Rio de Janeiro. Adotando uma abordagem disruptiva, baseada na tríade pesquisa, inovação e políticas públicas, a Unidade de Pesquisa tem se destacado em suas entregas para a sociedade. Com um olhar voltado para o futuro, ela tem sido capaz de contribuir significativamente com os ODS da Agenda 2030. Isso inclui iniciativas voltadas para a erradicação da pobreza (ODS 1), segurança alimentar (ODS 2), acesso à água potável e saneamento (ODS 6), promoção de energia limpa (ODS 7), adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo (ODS 12), combate às mudanças climáticas (ODS 13), conservação dos ecossistemas terrestres (ODS 15) e fortalecimento das parcerias globais para o desenvolvimento sustentável (ODS 17).

Este livro retrata a trajetória e o protagonismo da Embrapa Meio Ambiente na busca pela sustentabilidade da Agricultura e do Meio Ambiente em cinco grandes temas: Qualidade Agroambiental e Sistemas Produtivos Sustentáveis; Avaliação de Impactos e Gestão Ambiental da Agricultura; Bioprospecção e Biotecnologia Ambiental; Mudanças Climáticas Globais e Agricultura; Políticas Públicas. Em cada um desses temas são apresentadas soluções de pesquisa e desenvolvimento, inovação e

apoio a políticas públicas, no sentido de aumentar a produção de alimentos e promover a sustentabilidade dos sistemas agroalimentares, reduzindo os impactos ao meio ambiente e à biodiversidade.

*Ana Paula Contador Packer*  
Chefe-Geral da Embrapa Meio Ambiente

# PREFÁCIO

No mundo conturbado da atualidade, crescem polarizações de caráter ideológico, econômico, religioso, étnico, de gênero e de outras naturezas, levando nações inteiras a confrontos violentos e categorias profissionais importantes a desafiarem governos com provocações que raíam a desordem institucional.

Nesse cenário assustador, quatro novos cavaleiros do Apocalipse galopam avançam pelas fronteiras entre países e continentes, assombrando, com sua ferocidade, sociedades e governos, independentemente de suas crenças e realidades. São eles: a insegurança alimentar, a insegurança energética, as mudanças climáticas e a desigualdade social.

Parece cada vez mais claro que o grande adversário desses fantasmagóricos cavaleiros será a produção agropecuária. Só ela gerará alimentos e energia renovável, criando empregos e renda, além de garantir a preservação dos recursos naturais.

Essa ação vai ocorrer principalmente no cinturão tropical do planeta – América Latina, África subsaariana e boa parte da Ásia –, porque é aí que está a maior quantidade de terra disponível para o crescimento horizontal da produção, onde a produtividade pode aumentar com a inovação tecnológica. Com certeza, a Europa do leste também contribuirá com uma maior oferta de produtos agrícolas do que a atual, mas não na mesma proporção do cinturão tropical. E nessa vasta região, o Brasil detém a liderança tecnológica e pode ser o grande protagonista no combate aos cavaleiros do terror, inimigos da paz.

Mas esse protagonismo carece de uma estratégia cujos componentes são imensamente conhecidos e dependem da vontade política do Estado brasileiro, numa grande parceria entre o setor empresarial e o governo. São eles:

- Infraestrutura e logística, notadamente construídas a partir de parcerias público-privadas;
- Acordos comerciais com grandes países, ou blocos de países consumidores, que garantam o mercado indispensável ao crescimento;
- Política de renda alicerçada no seguro rural que consolide a estabilidade da atividade rural e agroindustrial;
- Tecnologias inovadoras com ênfase para a digitalização no campo e que considerem o mercado de carbono em perspectiva;
- Organização dos produtores, em especial por meio de cooperativas agropecuárias que agreguem valor às commodities agrícolas.

Mas nada disso faz sentido sem a questão central da competitividade global: sustentabilidade. Quem não produzir sustentavelmente, não terá espaço no mundo contemporâneo. E o Brasil pode e deve ser o campeão mundial de sistemas sustentáveis de produção.

Este livro é a prova clara dessa realidade. Com ele, a Embrapa Meio Ambiente mostra que temos todas as condições de ensinar ao mundo tropical como enfrentar vitoriosamente os quatro cavaleiros modernos do Apocalipse, transformando o cinturão tropical da Terra no redentor da paz universal. Basta que o Estado brasileiro se convença do papel que a História oferece ao nosso país e assuma a responsabilidade correspondente. A Embrapa está fazendo a sua parte.

*Roberto Rodrigues*

Professor Emérito da Fundação Getúlio Vargas – Agro  
Ex-ministro da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

# SUMÁRIO

<b>Parte I • Qualidade Agroambiental e Sistemas Produtivos Sustentáveis</b>	<b>029</b>
<b>Capítulo 1 • Práticas sustentáveis na produção da cana-de-açúcar</b>	<b>031</b>
<b>Capítulo 2 • Adequação agroambiental da propriedade rural</b>	<b>061</b>
<b>Capítulo 3 • Uso de resíduos como fertilizantes e/ou condicionadores do solo: biocarvão e biossólidos</b>	<b>099</b>
<b>Capítulo 4 • Contribuições da pesquisa ao desenvolvimento e adoção de Sistemas Agroflorestais Agroecológicos</b>	<b>135</b>
<b>Capítulo 5 • Produção integrada de Morango (PIMo) como modelo de implementação de sistema de produção sustentável</b>	<b>169</b>
<b>Capítulo 6 • Conservação do Solo e da Água no Ambiente Agrícola</b>	<b>209</b>
<b>Capítulo 7 • Monitoramento Ambiental e Manejo Produtivo e Sanitário da Aqüicultura</b>	<b>237</b>
<b>Capítulo 8 • Avanços e desafios para a conservação e o manejo sustentável de abelhas-sem-ferrão</b>	<b>287</b>
<b>Capítulo 9 • Dimensão social e econômica dos sistemas agroalimentares da agricultura familiar</b>	<b>325</b>

<b>Parte 2 • Avaliação de Impactos e Gestão Ambiental da Agricultura</b>	<b>361</b>
<b>Capítulo 10 • Avaliação de Ciclo de Vida</b>	<b>363</b>
<b>Capítulo 11 • Avaliação de impactos e indicadores de sustentabilidade para gestão ambiental de atividades rurais</b>	<b>391</b>
<b>Capítulo 12 • Uso de bioindicadores na avaliação da qualidade ambiental</b>	<b>411</b>
<b>Capítulo 13 • Monitoramento Hidrológico em Bacias Agrícolas</b>	<b>451</b>
<b>Capítulo 14 • Organismos-teste e biomarcadores como ferramentas na avaliação ecotoxicológica em diferentes ecossistemas</b>	<b>487</b>
<b>Capítulo 15 • Métodos para a determinação de resíduos e contaminantes em amostras ambientais e de alimentos</b>	<b>519</b>
<b>Parte 3 • Bioprospecção e Biotecnologia Ambiental</b>	<b>559</b>
<b>Capítulo 16 • Bioprospecção de microrganismos com potencial de uso na agricultura</b>	<b>561</b>
<b>Capítulo 17 • Controle biológico de doenças de plantas</b>	<b>601</b>
<b>Capítulo 18 • Serviços quarentenários, visando controle biológico clássico, e estratégias para prevenção, monitoramento e controle de pragas</b>	<b>645</b>
<b>Capítulo 19 • O papel do microbioma da rizosfera no desenvolvimento e proteção das plantas</b>	<b>719</b>
<b>Capítulo 20 • Bioinsumos de origem vegetal para uso na agricultura</b>	<b>743</b>
<b>Capítulo 21 • OGM e agricultura – a ciência na solução de problemas</b>	<b>775</b>

<b>Parte 4 • Mudanças Climáticas Globais e Agricultura</b>	<b>817</b>
<b>Capítulo 22 • Mudança do Clima e a Agenda 2030</b>	<b>819</b>
<b>Apêndice A • Atuação da Embrapa Meio Ambiente no tema de mudanças climáticas</b>	<b>840</b>
<b>Capítulo 23 • Projeções de mudanças climáticas e seus impactos na distribuição geográfica de doenças e pragas agrícolas</b>	<b>841</b>
<b>Capítulo 24 • Mudanças climáticas e problemas fitossanitários</b>	<b>875</b>
<b>Apêndice A • Performance do experimento Climapest-FACE de 2011 a 2015, obtidos a partir dos valores em torno da concentração alvo de CO<sub>2</sub> (550±100 μmol.mol<sup>-1</sup>)</b>	<b>910</b>
<b>Capítulo 25 • Monitoramento dos Fluxos de Gases do Efeito Estufa e Evapotranspiração em Cana-de-Açúcar: Balanços e Modelagem</b>	<b>911</b>
<b>Capítulo 26 • Inventários de Emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) na Agricultura e Pecuária</b>	<b>927</b>
<b>Capítulo 27 • Agricultura de Baixo Carbono: Alternativa para a Sustentabilidade e Adaptação às Mudanças Climáticas</b>	<b>959</b>
<b>Parte 5 • Políticas Públicas</b>	<b>995</b>
<b>Capítulo 28 • Atuação da Embrapa Meio Ambiente em Políticas Públicas</b>	<b>997</b>



PARTE I

# QUALIDADE AGROAMBIENTAL E SISTEMAS PRODUTIVOS SUSTENTÁVEIS

*"Sustentabilidade é sobre viver no nosso  
planeta como se pretendêssemos ficar  
nele para sempre"*  
Sir David Attenborough



## PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS NA PRODUÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR

*Nilza Patrícia Ramos, Cristiano Alberto de Andrade, Ana Paula Contador Packer, Osvaldo Machado Rodrigues Cabral, André May, Sergio de Oliveira Procópio, Raffaella Rossetto e Antonio Dias Santiago*

### INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é um destaque na agricultura brasileira desde o período do descobrimento. Seu cultivo iniciou-se na Capitania de São Vicente, próximo ao ano de 1532, e a partir de 1580 colocou o Brasil como um dos protagonistas na produção de açúcar (Figueiredo, 2008). Na safra 2022, essa cultura ocupou cerca de 26,1 milhões de hectares (ha) no mundo, dos quais 10 milhões estavam no Brasil (FAOSTAT, 2023), contribuindo com 8,5% (104 bilhões de reais) do total do valor bruto da produção (VBP) de lavouras e pecuária nacional (Brasil, 2022). Essa representatividade se deve à diversificação de produtos ofertados, como açúcar, etanol, energia elétrica gerada na queima do bagaço e, em menor proporção, porém não menos importante, a cachaça, o melado, o uso para alimentação animal, bioplástico e outros compostos da sucroquímica e da química verde (Cherubini, 2010). O aproveitamento dos resíduos agrícolas e industriais, entre eles a palha, a vinhaça, a torta de filtro e as cinzas, também colocam a cadeia da cana numa posição de referência no que diz respeito à sustentabilidade do sistema (Rossetto et al., 2013) e economia circular.

O sucesso na produção e na ampla oferta de produtos é alavancado pelo uso, por parte do setor sucroenergético, de tecnologias agrícolas cada vez mais adaptadas às condições regionais/locais de cultivo. O desenvolvimento e a disponibilização de tecnologias avançadas para cana-de-açúcar se devem ao esforço contínuo de renomadas instituições de pesquisa, por exemplo o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), o extinto Instituto do Açúcar e Álcool (IAA), substituído na década de 1990 pela Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA), o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) e, mais recentemente, à Embrapa, contando com o apoio do setor produtivo no financiamento e nas iniciativas de pesquisa.

As inovações tecnológicas disponibilizadas para a cultura, nas últimas décadas, cobrem uma diversidade de áreas e temas desde a obtenção de variedades com maior potencial de produção, maior teor de açúcar e com alguma tolerância aos estresses

bióticos a abióticos (Figueiredo, 2008), passando pelo mapeamento de solo, aprimoramento na recomendação de adubação, mecanização da colheita, com redução drástica da área queimada e dos impactos negativos dessa prática (Capaz et al., 2013). Também houveram avanços significativos no aproveitamento dos resíduos agroindustriais e no uso dos bioinsumos e na geração energética.

A preocupação com a sustentabilidade no sistema de produção canavieiro adquiriu relevância num período mais recente devido à ampliação da discussão sobre mudanças climáticas globais. A sociedade e economia estão mobilizadas nesta temática, incluindo a proposição de políticas públicas e ações mais específicas no setor agropecuário, para adaptação e mitigação do aquecimento global decorrente da interferência antrópica (Buendia et al, 2019). O foco exclusivo na produtividade e expansão da fronteira agrícola é agora ultrapassado. Os impactos ambientais e sociais fazem parte da governança das organizações e pautam também o desenvolvimento de uma nova agricultura, que alia produtividade, preservação, biodiversidade, economia circular, serviços ambientais, compromissos internos e externos de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), dentre outros aspectos.

Os compromissos firmados entre Brasil e Organização das Nações Unidas (ONU) para o alcance de objetivos de desenvolvimento sustentável - ODS (Madari et al., 2018) confirmam a importância da agricultura para a sustentabilidade global, assim como a tendência crescente de valorização e busca de boas práticas no setor agrícola. O setor canavieiro devido à produção de etanol, que é um biocombustível, destaca-se nesses compromissos e tem adotado boas práticas agrícolas e industriais em seus sistemas produtivos. A entrada em vigor da política RenovaBio, em 2018, constituiu importante incentivo para ações de sustentabilidade ambiental e econômica, premiando unidades produtoras com melhores notas de eficiência energético-ambiental (Brasil, 2017) e evitando emissões de GEE, com geração adicional de renda com a comercialização de cerca de 117 milhões de CBIOS (créditos de descarbonização) entre janeiro de 2020 a janeiro de 2024 (Agência Nacional do Petróleo, 2024).

A Embrapa Meio Ambiente, cuja missão é *Viabilizar soluções de PDE-I para promover uma agricultura sustentável e melhorar a qualidade ambiental em benefício da sociedade brasileira*, vem entregando resultados e inovação por meio das pesquisas com cana-de-açúcar. Este capítulo abordará algumas contribuições voltadas para o manejo sustentável da cana-de-açúcar, conforme uma sequência de práticas usadas ao longo das etapas do sistema de cultivo. São apresentadas práticas envolvendo método de propagação por meio de mudas pré-brotadas para implantação da cultura, seguindo para o manejo no período da reforma até efeitos do recolhimento parcial da palha na colheita sobre a planta e o ambiente.

## PRÁTICAS DE PROPAGAÇÃO DA CANA

A disponibilidade de material propagativo com melhor sanidade, pureza e rastreabilidade é indispensável para o bom desempenho de um canavial (Landell et al., 2012). A ampliação dos materiais comerciais de cana ocorre essencialmente por multiplicação vegetativa, em que cada indivíduo se torna um clone da planta mãe, carregando suas características genéticas e fenotípicas (Casagrande; Vasconcelos, 2010). Havendo misturas de material propagativo, inevitavelmente o resultado será um canavial pouco homogêneo e de difícil manejo.

A forma preferencial e majoritária de multiplicação da cana-de-açúcar ainda ocorre com uso de toletes (colmos inteiros ou colmos fracionados a cada três ou quatro gemas), distribuídos manualmente ou mecanicamente sobre os sulcos de plantio. Entretanto, ao mesmo tempo que as máquinas aceleram o processo, elas aumentam os danos mecânicos nas gemas, exigindo maior consumo de material propagativo (acima de 20 t de colmos por hectare plantado), o que onera significativamente o custo de produção (Robothan; Chapell, 2002). Estão em estudo alternativas para sanar parte desse problema, uma das promissoras é a muda pré-brotada (MPB), que foi desenvolvida e vem sendo incentivada pela equipe do Centro de Cana do IAC (Xavier et al., 2014). A técnica em si foi baseada em trabalhos de Ramaiah et al. (1977), que demonstraram possibilidades de eliminação dos entrenós dos toletes de cana, utilizando apenas as gemas individualizadas associadas à pequenas partes do tolete, denominadas minirebolo ou minitolete (Figuras 1.1A e 1.1B).



Figura 1.1. Imagens de minitoletes ou minirebols: (A) e (B); gema individualizada (C) para uso na produção de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar.

Uma adaptação à técnica de produção do MPB envolve a substituição do uso dos minirebols por gemas individualizadas de cana (Figura 1.1C), retiradas manual ou mecanicamente. Com essa inovação, utiliza-se apenas uma gema com primórdios radiculares conjugados, em uma estrutura cilíndrica com 7 a 18 milímetros (mm) de raio a partir do centro da gema, sendo que a estrutura radicular originará os primórdios radiculares da futura plântula (May; Ramos, 2019). Isso economiza material propa-

Fotos: Nilza Patrícia Ramos

gativo, espaço e substrato, além de permitir o uso das estruturas sobressalentes do colmo para processamento industrial ou reaproveitamento da composição de fertilizantes organominerais, contribuindo com a otimização de rendimentos por unidade produtiva e com a economia circular.

A taxa de emergência a partir de gemas individualizadas com dimensão menor do que 14,5 mm e minirebolos não difere estatisticamente entre si, variando entre 78–85% (May; Ramos, 2019), o que é aceitável e desejável durante a produção de MPB. Uma vantagem adicional é a facilidade de automação completa da extração das gemas, o que otimiza o processo e permite a economia no volume de substrato necessário. Isso porque, além do uso de tubetes de 180 centímetro cúbico (cm<sup>3</sup>) - comum para minirebolos -, também podem ser utilizadas bandejas plásticas ou de isopor, contendo 200 células com 18 cm<sup>3</sup> de volume. A opção por bandejas de células ou tubetes dependerá do interesse e nível tecnológico do produtor, uma vez que as bandejas exigem maior atenção com a irrigação, por exemplo, mas, por outro lado, permitem a entrega da muda a partir de 45 dias, o que leva à economia de até 15 dias, desde que respeitadas as exigências do manejo.

O uso de MPB permite também que outras tecnologias possam ser adotadas, como inoculantes biológicos com potencial de tolerância ao estresse hídrico e promoção de crescimento (May et al., 2019, 2021). Esta é uma tecnologia que se alinha totalmente ao grande desafio da agricultura atual, que é a adaptação às mudanças climáticas, em que se incluem veranicos intensos (Naser; Shani, 2016). Sabe-se que a associação entre plantas e microrganismos pode trazer grandes benefícios e um deles é a tolerância ao estresse hídrico (Grover et al., 2013), já obtido na associação entre *Bacillus aryabhatai* e soja (Park et al., 2017), milho (Kavamura et al., 2013) e, mais recentemente, cana (May et al., 2019).

Os benefícios podem mudar conforme a variedade de cana, com alguns grupos responsivos e outros nem tanto (Stancate et al., 2015). Algumas respostas positivas são importantes perante o desafio de buscar práticas de manejo eficientes para proteger as plantas de cana do estresse hídrico que não exijam aumentos no consumo de água por irrigação, principalmente, nos períodos de implantação da cultura em campo e mais ainda com o uso de MPB.

São visíveis os efeitos benéficos no desenvolvimento da parte aérea e no sistema radicular de MPB de cana da variedade IAC 91–1099 inoculada com *Bacillus aryabhatai* (Figura 1.2). Houve aumento de 58% e 123%, respectivamente, na massa seca de parte aérea e de raízes de plantas (60 dias) inoculadas em relação às não inoculadas, após regimes de irrigação que simulavam estresse hídrico (May et al., 2019).

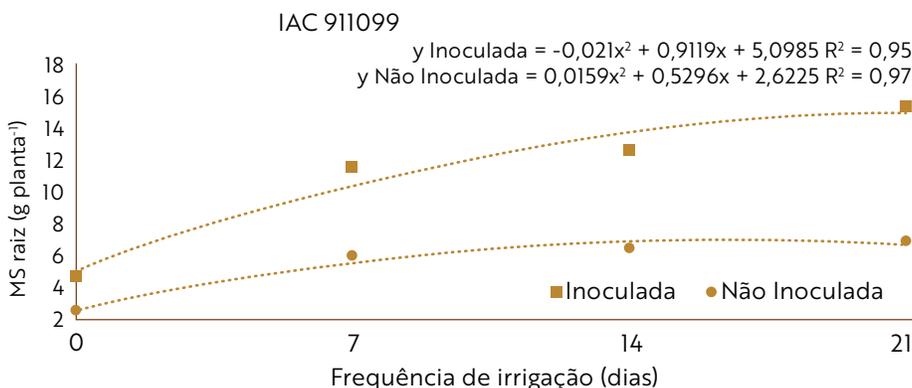


Fotos: André May

Sem Inoculante | Com Inoculante    Sem Inoculante | Com Inoculante    Sem Inoculante | Com Inoculante

**Figura 1.2.** Imagem da parte aérea (A) e das raízes (B e C) de plantas de cana-de-açúcar, variedade IAC 91-1099 inoculadas com *Bacillus aryabhatai* e não inoculadas, com uso de regime de uma lâmina de irrigação a cada sete dias (A e B) e 21 dias (C).

O fato do *Bacillus aryabhatai* ter sido prospectado no bioma da Caatinga lhe confere tolerância às condições ambientais extremas e grande capacidade de desenvolvimento em distintos habitats (Kavamura et al., 2013), com destaque maior para a proteção ao sistema radicular das plantas, o que se confirmou também na cana (Figura 1.3) submetida a interrupções de irrigação por até 21 dias (May et al., 2019).



**Figura 1.3.** Massa seca de raízes de plantas de cana-de-açúcar, variedade IAC 91-1099 inoculadas com *Bacillus aryabhatai* e não inoculadas, com uso de regime de diferentes frequências de irrigação (May et al., 2019)

Cabe destacar que o sucesso no uso do inoculante ocorreu na fase de implantação da cultura, em condições controladas e que os estudos continuam, com o intuito de verificar qual sua ação e longevidade em campo. Isso porque, em condições de campo, há maior pressão da comunidade microbiana já instalada no solo, além de outros fatores que podem alterar seu comportamento e sucesso.

O uso de inoculantes biológicos em plantas para promoção de crescimento e aumento da tolerância de plantas a estresses abióticos (seca) é uma linha de pesquisa

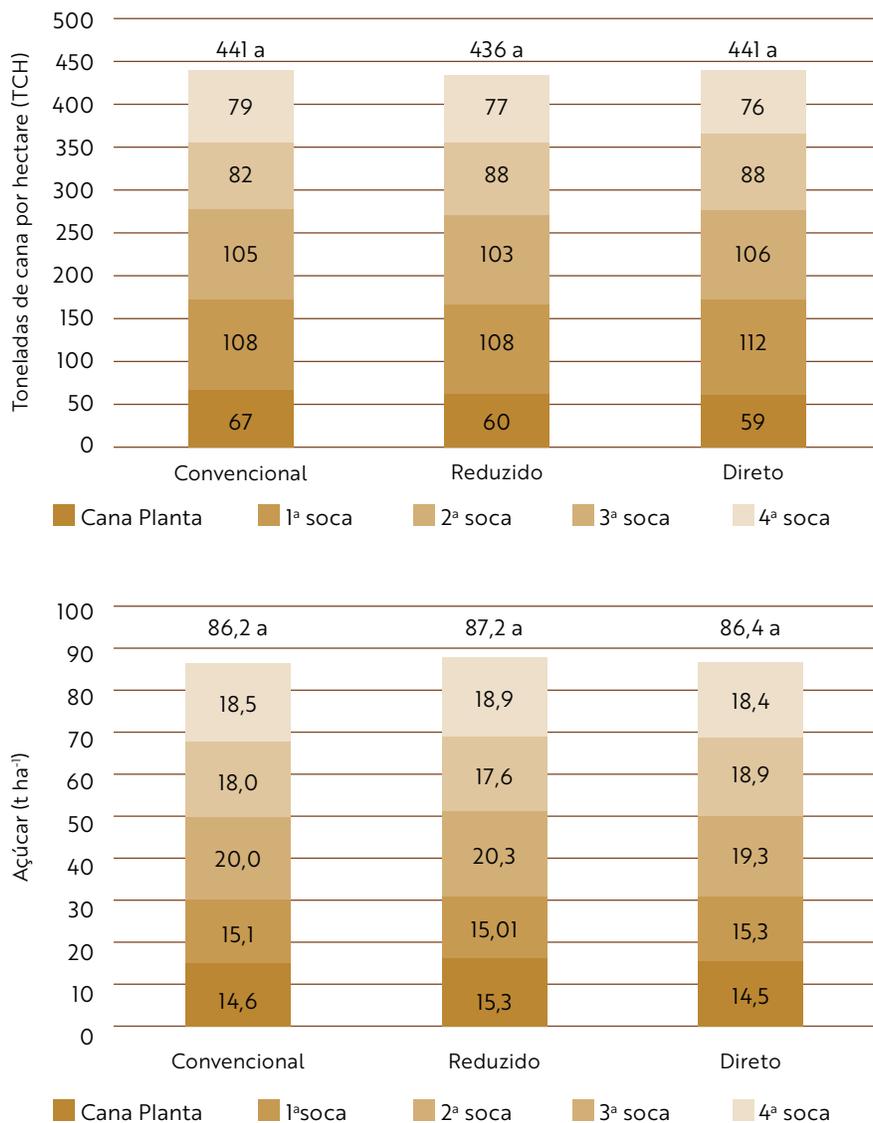
da Embrapa Meio Ambiente que pode contribuir, significativamente, com o aumento da sustentabilidade em sistemas agrícolas. Logicamente, que as interações entre plantas e microrganismos são complexas e dinâmicas e, portanto, os resultados podem se alterar a depender do material genético e mesmo do ambiente, mas já é um passo rumo à necessidade atual de adaptações às mudanças climáticas. Mais informações sobre inoculantes biológicos são tratados nos Capítulos 16, 17 e 19 deste livro.

## PREPARO DO SOLO NA REFORMA DA CANA

As preocupações com os métodos de propagação e com o material genético utilizados na implantação de uma área de cana-de-açúcar são parte importante no sucesso produtivo, mas não exclusivas. Há necessidade de um bom preparo da área de implantação, garantindo que grande parte das condições ideais necessárias para o crescimento da cultura sejam alcançadas. Isso porque, ao longo do seu ciclo, a cana passa por um declínio produtivo promovido, em grande parte, pelo aumento das falhas de plantas e degradação de atributos químicos e físicos do solo (Otto et al., 2011; Cury et al., 2014).

Um bom preparo não é sinônimo de mobilização intensa e profunda do solo. Isso já foi verdade absoluta para o setor canavieiro, porém o paradigma foi quebrado com a divulgação de informações de sucesso no uso de preparo reduzido e, até mesmo, no plantio direto (Tavares et al., 2010; Carvalho et al., 2017). Logicamente, a adoção de uma prática mais convencional ou de uma prática mais conservacionista dependerá das condições encontradas na área; de uma avaliação cuidadosa e local, que permita a adoção do mínimo de revolvimento, com economia de recursos e ganhos ambientais.

Num estudo conduzido por cinco cortes na Usina Açucareira Guaíra (Guaíra, SP) em Latossolo argiloso (63%) não foram encontradas diferenças significativas na produtividade de cana (TCH) e na produção de açúcar (Figura 1.4) em função do tipo de preparo do solo adotado na reforma do canavial. Mesmo no período de plantação da cana, que enfrentou uma seca atípica no ano de 2014 e, consequentemente, esperavam-se diferenças entre tratamentos, as produtividades foram semelhantes e se mantiveram ao longo das quatro socas, chegando ao acumulado médio de 439 t ha<sup>-1</sup> e média anual de 88 t ha<sup>-1</sup>, valor bem acima da média nacional, que é de 77 t ha<sup>-1</sup>, considerando-se as últimas cinco safras para São Paulo (Conab, 2021). Como a produtividade se manteve acima da média, mesmo na quarta soca, entendeu-se que não havia restrições químicas e físicas de solo e que o preparo reduzido e até mesmo o não preparo/plantio direto poderiam ser recomendados para a área.

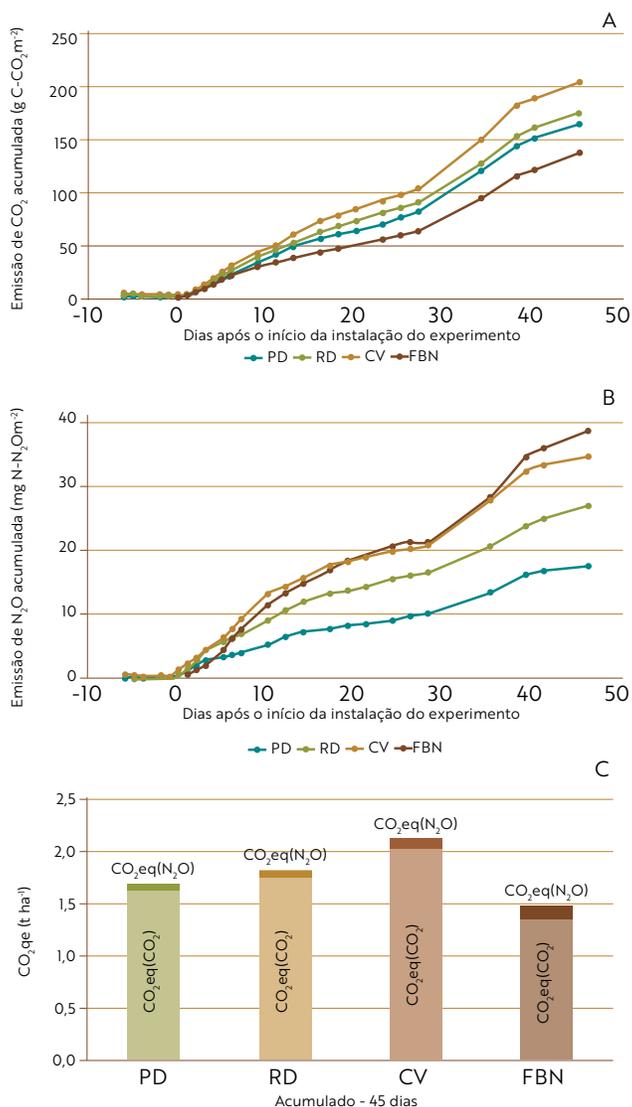


**Figura 1.4.** Produtividade de colmos (TCH) e rendimento de açúcar ( $t\ ha^{-1}$ ) obtidos em canavial preparado com uso de práticas convencionais, reduzida e em plantio direto, em experimento conduzido na Usina Açucareira Guaira (Guaira, SP) entre os anos de 2013–2019.

Destaca-se que, essa informação se soma a outras favoráveis ao uso do preparo reduzido e plantio direto em cana, já relatadas na literatura, com o diferencial de ter avaliado a longevidade dos efeitos do preparo do solo no ciclo do canavial. Entende-se que esse adicional traz maior confiança ao produtor na tomada de decisão sobre seu uso em campo.

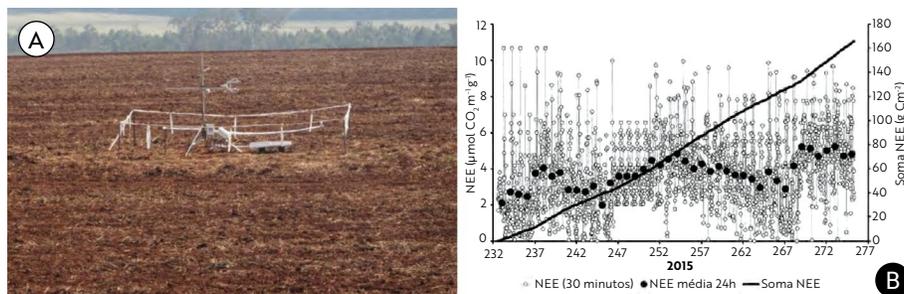
Paralelamente às avaliações de produtividade comparativa entre os sistemas de preparo do solo, foram quantificadas as emissões de GEE, como forma de se verificar impactos ambientais (Figura 1.5). O acompanhamento das emissões, nos primeiros 45 dias após a implementação da cultura da cana-de-açúcar, mostrou que o sistema com uso de preparo reduzido do solo e o sistema em que não há revolvimento, apenas plantio (plantio direto), emitem, respectivamente, 20% e 14% menos dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) em relação ao sistema com preparo convencional (Figura 1.5A), corroborando com pesquisas anteriores que afirmam que a movimentação intensa e profunda do solo leva à destruição de seus agregados e consequente exposição de parte da matéria orgânica a ação oxidativa a cargo dos microrganismos do solo (De Luca et al., 2008), resultando na liberação de carbono na forma de  $\text{CO}_2$  (La Scala et al., 2006).

Um tratamento adicional, em que a prática do plantio direto foi associada com a aplicação das bactérias fixadoras de nitrogênio (FBN) sobre os toletes (mudas) da cana também foi estudado, e trouxe emissões de  $\text{CO}_2$  33% menores que as observadas no preparo convencional, sem uso de FBN (Figura 1.5A). Entretanto, a associação da FBN com o plantio direto promoveu emissões 10%, 30% e 55% maiores de óxido nitroso -  $\text{N}_2\text{O}$ , em relação ao preparo convencional, reduzido e direto sem FBN, respectivamente (Figura 1.5B). O  $\text{N}_2\text{O}$  é um gás emitido em quantidades significativamente menores que as de  $\text{CO}_2$ , mas com poder poluente 298 vezes maior. Essa contribuição de  $\text{N}_2\text{O}$  não foi expressiva o suficiente para neutralizar os benefícios da associação das práticas de plantio direto (PD) e FBN, em termos de  $\text{CO}_2$ , conforme mostra a Figura 1.5C. Assim, é possível inferir que as práticas conservacionistas podem minimizar os efeitos negativos das atividades agrícolas, que naturalmente são emissoras de GEE. Nesse sentido, ao se multiplicar as emissões evitadas (Figura 1.5) pela área de reforma de cana no estado de São Paulo, que foi de, aproximadamente, 567 mil ha ano em 2021 (Conab, 2022), teria emissões evitadas de 380 e 220 mil toneladas de  $\text{CO}_2\text{eq}$  com a opção pelo PD com FBN e sem FBN, respectivamente. No caso do plantio reduzido, as emissões evitadas estão na faixa de 150 mil toneladas de  $\text{CO}_2\text{eq}$ .



**Figura 1.5.** Emissões de CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>O oriundas do preparo do solo na reforma do canavial, com o uso de práticas convencionais, reduzida e em plantio direto. As emissões acumuladas de (A) dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em g C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> e de (B) óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) em mg N-N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> e a (C) soma de ambos transformados em CO<sub>2</sub>eq medidas nos 45 dias após a instalação do experimento. Experimento conduzido na Usina Açucareira Guaira (Guaira, SP) entre os anos de 2013–2019.

Emissões de carbono na forma de  $\text{CO}_2$  na reforma do canavial são importantes no balanço de carbono do sistema de produção de cana (La Scala et al., 2006) e determinam em parte o potencial da cultura e de seus produtos na mitigação das mudanças climáticas globais. Como forma de quantificar o impacto da reforma na emissão de  $\text{CO}_2$  ou perda de C do solo, Cabral et al (2016) conduziram uma pesquisa em área de reforma de cana-de-açúcar, na Fazenda da Aeronáutica em Pirassununga, SP (Latossolo Vermelho com 75% de argila), para quantificar essas emissões a partir do preparo convencional (destruição de soqueira, duas arações profundas com aiveca e duas gradagens niveladoras). A análise dos fluxos contínuos de  $\text{CO}_2$  por 42 dias (Figura 1.6), usando o sistema de correlação de vórtices, com equipamento EC150 Campbell Sci., Logan UT-USA, quantificou a emissão de 607,6 gramas (g) de  $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2}$  ( $6,08 \text{ t ha}^{-1}$  de  $\text{CO}_2$ ) ou  $165,7 \text{ g de C m}^{-2}$  ( $1,66 \text{ t ha}^{-1}$  de C). Esse valor corresponderia à redução de 4% no estoque de carbono do solo, considerando a camada 0–20 ( $41,42 \text{ t ha}^{-1}$  de C no solo) (Cabral et al., 2016). A menor mobilização do solo teria, portanto, potencial para redução dessas emissões na reforma do canavial, o que significa C que permanece no solo, sendo agregado pelo processo de sequestro de C, assim como um desempenho ambiental mais favorável da cultura e de seus produtos.



**Figura 1.6.** Imagem da área de reforma para uso em cana-de-açúcar com equipamento para quantificação de  $\text{CO}_2$  (A) e séries temporais de fluxos  $\text{CO}_2$  (30 minutos e média de 24 horas) entre o solo e atmosfera (NEE) e soma ao longo de 42 dias de observações Cabral et al (2016)

Fonte: Cabral et al (2016)

A escolha mais adequada de preparo a ser adotada dependerá das condições da área de reforma. Áreas com compactação grave e que restringe o desenvolvimento do sistema radicular da cana, com incidência generalizada de pragas como *Sphenophorus levi*, *Castnia licus* e outras limitações por fatores bióticas e abióticas podem conduzir a adoção de sistemas com mobilização mecânica mais intensa do solo. Em outras situações, porém, sistemas mais conservacionistas devem ser preferidos.

Cabe destacar que nos demais casos, em que inexistem limitações críticas, a recomendação é de uso de práticas conservacionistas. Há desempenho produtivo

de colmos e retorno de açúcar semelhantes aos dos métodos tradicionais, com o benefício ambiental de evitar a perda do carbono estocado no solo, durante os anos de uso de cana-crua. Até o presente momento, este benefício ainda não é capitalizado pelo produtor rural, mas a expectativa é de que não demore a acontecer, frente à todas as iniciativas de valorização de culturas com baixas emissões, onde se inclui o Programa ABC+<sup>1</sup> do Ministério da Agricultura e a política do RenovaBio do Ministério de Minas e Energia.

## PRÁTICAS DE USO DAS LEGUMINOSAS NA REFORMA DA CANA

A ocupação da área com outras culturas no período da reforma apresenta caráter estratégico do ponto de vista da sustentabilidade do sistema de produção da cana-de-açúcar. Leguminosas de cobertura, também denominadas por adubos verdes, compõem um dos grupos preferenciais de espécies vegetais para serem cultivadas nesse período. Os fatores dessa escolha envolvem: incorporação de nitrogênio (N) orgânico ao solo, reduzindo a necessidade de utilização de fertilizantes químicos nitrogenados (Perin et al., 2004); aporte de biomassa vegetal ao solo (Resende et al., 2000); ciclagem de nutrientes (Silva et al., 2002); manutenção do teor de água do solo (Pereira et al., 2017); qualidade/estabilização do carbono orgânico do solo (Coelho et al., 2013); auxílio na qualidade física de solos compactados (Foloni et al., 2006); proteção física contra erosão (Alvarenga et al., 1995); supressão de plantas daninhas (Favero et al., 2001); e consequente aumento da produtividade da cana-planta cultivada em sucessão (Ambrosano et al., 2011).

Por outro lado, o período da reforma também se presta para a produção comercial de grãos, destacando-se, no Estado de São Paulo, as culturas do amendoim e mais recentemente da soja, que também são leguminosas. A disponibilização de cultivares de soja de ciclo mais curto, denominadas de superprecoces, aliado ao fator mercadológico positivo da cultura, vêm impulsionando o cultivo de soja no período da reforma dos canaviais paulistas. Lavouras de soja de alto potencial produtivo podem ser observadas em diversas áreas de renovação de canaviais, inclusive cultivadas no sistema de Meiosi (Figura 1.7). Diante desse cenário, os produtores precisam optar entre investir na melhoria da qualidade do solo, preferindo os adubos verdes, ou em cultivos comerciais, como a soja, que traz retorno econômico imediato, mas pode contribuir com menos benefícios agrônômicos ao canavial subsequente.

---

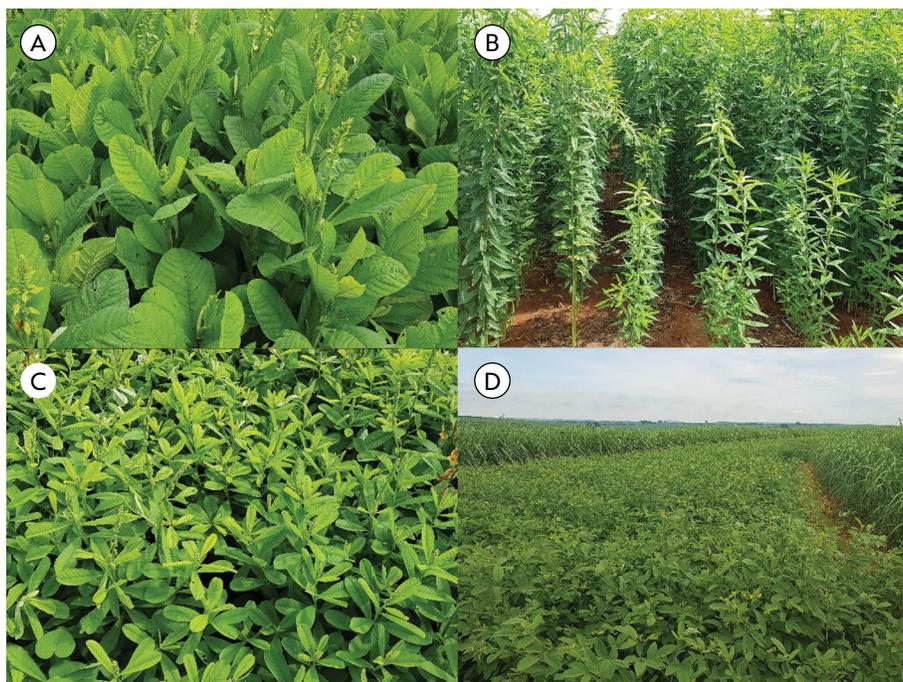
<sup>1</sup> Plano ABC. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc>



Figura 1.7. Soja de alto potencial produtivo cultivada no período da reforma do canavial no sistema de meiosi.

As espécies *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria juncea*, *Crotalaria breviflora* e *Cajanus cajan* (guandu-anão) estão entre os adubos verdes mais cultivados na reforma dos canaviais (Figura 1.8). Na Tabela 1.1 observam-se valores de biomassa e quantidades de nitrogênio e carbono que essas espécies podem disponibilizar em sistemas agrícolas. Esses resultados compõem uma pesquisa conduzida entre novembro de 2020 e fevereiro de 2021, em uma área comercial de cana-de-açúcar (Agrícola Trevizoli) localizada no município de Taquaritinga, SP, cujo perfil é, sobretudo, Argissolo, com 12% de argila na camada de 0–20 cm. Diferenças significativas entre as espécies foram observadas para: biomassa fresca/seca produzida, nitrogênio e carbono disponibilizados ao solo e relação C:N dos materiais. Essas informações são relevantes para a definição/escolha da(s) leguminosa(s) mais adequada(s) a serem introduzidas no sistema de produção da cana-de-açúcar.

Se o objetivo for a incorporação de nitrogênio ao sistema, as espécies com maior destaque, nas condições experimentais, foram *C. spectabilis*, guandu-anão e *C. juncea*, contribuindo com valores entre 240 e 316 kg ha<sup>-1</sup> de N ao solo. Os aportes de carbono também foram expressivos, com valores variando entre 3.675 kg ha<sup>-1</sup> de C fornecido pela *C. breviflora* a 6.796 kg ha<sup>-1</sup> de C pela *C. juncea*, o que pode contribuir com a recuperação do carbono perdido no preparo do solo. Considerando um aporte de C via biomassa de adubo verde igual a 5.000 kg ha<sup>-1</sup> e relação C/N de 20/1, pode-se pesar numa mineralização de 83 kg ha<sup>-1</sup> de N (disponibilizado para a cana-de-açúcar), suficiente para alcançar uma relação C/N da biomassa em decomposição de 30/1. A partir desse ponto, 2/3 do C serão emitidos como C-CO<sub>2</sub> (3.350 kg ha<sup>-1</sup>) e 1/3 incorporado como C no solo (1.650 kg ha<sup>-1</sup>). É importante perceber, que além de fornecer N para a cultura da cana, o potencial para sequestro de C praticamente anula os 1.657 kg ha<sup>-1</sup> de C-CO<sub>2</sub> perdido na reforma do canavial (Cabral et al., 2016). Caso não seja usado o adubo verde, cultivando-se novamente cana-de-açúcar, com taxas de sequestro de C entre 1.020 e 1.870 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (La Scala et al., 2012), seria necessário, praticamente, um corte da cana para recuperar o C perdido na reforma.



Fotos: Sergio de Oliveira Procópio

**Figura 1.8.** *Crotalaria spectabilis* (A), *Crotalaria juncea* (B), *Crotalaria breviflora* (C), *Cajanus cajan* (guandú-anão) e (D) cultivados em áreas de reforma de canaviais.

O consórcio de adubos verdes (Figura 1.9) é uma alternativa de cultivo ainda pouco explorada. De forma geral tem-se a ideia de que a diversificação de culturas leva a melhorias dos diferentes componentes ambientais (solo, água e biodiversidade de organismos) de um sistema agrícola (Franchini et al., 2011). Entretanto, isso não se confirmou quanto à disponibilidade de biomassa, nitrogênio e carbono proveniente de consórcios entre leguminosas (Tabela 1.1). A biomassa gerada pela quantidade de N e C foi inferior à observada durante o cultivo solteiro da maioria das espécies envolvidas no consórcio. Com isso, constata-se que esse aumento da diversidade biológica com o uso de consórcios de leguminosas pode não trazer benefícios adicionais que justifiquem a dificuldade operacional do plantio simultâneo de duas espécies.

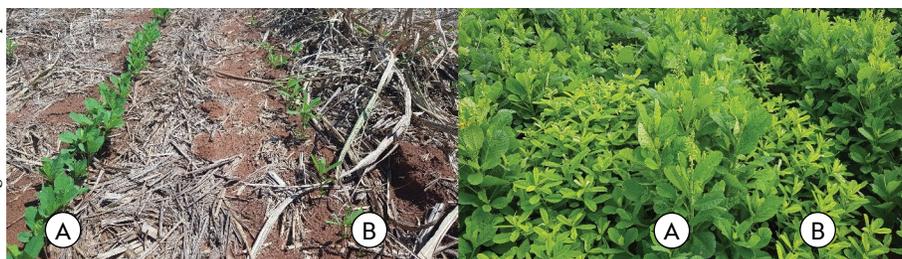
**Tabela 1.1.** Contribuições em biomassa fresca, seca, nitrogênio e carbono de diferentes leguminosas, no período do florescimento, cultivadas em área de reforma de canavial em meiosi, em Argissolo. Taquaritinga, SP.

Espécie	Biomassa (kg ha <sup>-1</sup> )	Massa seca (kg ha <sup>-1</sup> )	Qtde de N (kg ha <sup>-1</sup> )	Qtde de C (kg ha <sup>-1</sup> )	Relação C:N
<i>Crotalaria spectabilis</i> <sup>1</sup>	56.600 <sup>a2</sup>	12.367 <sup>a</sup>	316 <sup>a</sup>	5.794 <sup>a</sup>	19c
<i>Cajanus cajan</i> (guandu)	37.100b	12.600 <sup>a</sup>	258ab	6.413 <sup>a</sup>	25ab
<i>Crotalaria juncea</i>	40.683b	13.717 <sup>a</sup>	240ab	6.796 <sup>a</sup>	30 <sup>a</sup>
<i>Crotalaria breviflora</i>	37.883b	7.583b	220ab	3.675b	17c
<i>Dolichos lablab</i> (Lablab)	39.733b	8.017b	209b	3.847b	19c
<i>C.spectabilis</i> + <i>C.breviflora</i>	36.367b	7.417b	194b	3.521b	18c
<i>Guandu</i> + <i>Lablab</i>	30.518b	7.016b	168b	3.459b	20bc
C.V.	21%	19%	22%	19%	15%

<sup>1</sup>Leguminosas semeadas no espaçamento entrelinhas de 50 cm. <sup>2</sup> densidade de plantio das leguminosas seguiu recomendações comerciais, sendo: 32 sem m<sup>-1</sup> para *C. spectabilis*; 15 sem m<sup>-1</sup> para guandu-anão; 15 sem m<sup>-1</sup> para *C. juncea*; 32 sem m<sup>-1</sup> para *C. breviflora*; 15 sem m<sup>-1</sup> para *Lablab*; 32 sem m<sup>-1</sup> para mix *C.spectabilis* + *C.breviflora* e 15 sem m<sup>-1</sup> para mix *Guandu* + *Lablab*;

<sup>2</sup>médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si (Tukey - 1%)

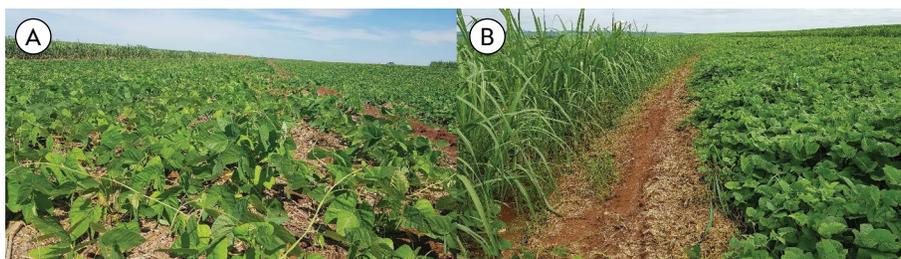
Fotos: Sérgio de Oliveira Procópio



**Figura 1.9.** Consórcio entre *Crotalaria spectabilis* (A) e *Crotalaria breviflora* (B) em áreas de reforma de canaviais.

Considerando-se a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, percebe-se que a recuperação do carbono perdido em qualquer etapa da produção exigirá um grande esforço de recuperação, com incorporações lentas. Assim, todas as práticas que contribuam para esse retorno e fixação de carbono e nitrogênio devem ser incentivadas e valorizadas. O uso dos adubos verdes no período de reforma é uma dessas práticas e deve ser incentivada sempre que possível.

Leguminosas de hábito trepador como a mucuna-cinza (*Mucuna pruriens*) e o lablab (*Dolichos lablab*) (Figura 1.10) devem ser utilizadas com cautela, ou mesmo evitadas, pois podem se tornar problemas na área de cultivo, caso não sejam manejadas antes de produzirem sementes. Esse fato é exemplificado pela elevada infestação de mucuna-preta em canaviais, em que uma espécie introduzida com a finalidade de ser um adubo verde vem se transformando em uma planta daninha de alta complexidade.



Fotos: Sergio de Oliveira Procópio

Figura 1.10. Mucuna-cinza (*Mucuna pruriens*) (A) e lablab (*Dolichos lablab*) (B) cultivados em áreas de reforma de canaviais no sistema de meiosi.

A mucuna-preta pode ser tornar uma planta invasora não apenas durante o cultivo da cana-de-açúcar, mas também no período da reforma do canavial, principalmente, quando a espécie escolhida apresenta crescimento lento e dificuldade de ocupação do ambiente, como é o caso da *Crotalaria breviflora* (Figura 1.11).



Fotos: Sergio de Oliveira Procópio

Figura 1.11. (A) Infestação de mucuna-preta em área de reforma de cana-de-açúcar devido ao crescimento lento e a baixa taxa de ocupação de espaço propiciado pela *Crotalaria breviflora*. (B) Comparativo do crescimento/porte da *Crotalaria breviflora* com a *Crotalaria juncea*, semeadas no mesmo dia.

Alguns herbicidas utilizados na cultura da cana-de-açúcar deixam resíduos no solo capazes de afetar o crescimento/desenvolvimento das leguminosas cultivadas no período da reforma do canavial. Entre esses herbicidas, destacam-se o picloram (resíduos no solo ativos por até três anos após a aplicação), o tebutiuron e o indaziflam (resíduos no solo ativos por até dois anos após a aplicação) e o amicarbazone (resíduos no solo ativos por até um ano após a aplicação). Esses períodos residuais podem ser alterados pela dose do herbicida, características do solo e condições ambientais. Desse modo, o uso de herbicidas nos últimos cortes da cana-de-açúcar deve ser um aspecto relevante no planejamento agrícola quando se objetiva a utilização de leguminosas no sistema de produção.

## MANEJO DA SOCA CONSIDERANDO O RECOLHIMENTO PARCIAL DA PALHA

A colheita mecanizada da cana-crua, impulsionada por pressões ambientais e sociais para encerramento da queima para a colheita, trouxe consigo a possibilidade de manutenção do resíduo cultural sobre o solo, isto é, a palha. Essa mudança tecnológica foi um marco no setor canavieiro fortemente impulsionada pela assinatura do Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético no estado de São Paulo em 2007 (acordo voluntário entre o governo e o setor sucroenergético para o encerramento antecipado da queima para colheita da cana-de-açúcar). Sendo assim, até a safra de 2016, a taxa de uso de mecanização na colheita da cana no Brasil foi de 92% (Conab, 2017) e para São Paulo, na safra 2020, foi de 99% (União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia, 2021).

A palha foi adicionada ao conjunto de produtos explorados pelo setor sucroenergético devido ao seu potencial de aproveitamento para bioeletricidade ou mesmo na produção de etanol de segunda geração pelo uso da lignocelulose (Santos et al., 2012). Esse último uso ainda enfrenta desafios quanto à sua viabilidade econômica, mas é uma tecnologia a ser considerada diante da necessidade de aumento na disponibilidade de fontes alternativas de energia para o país. Logo, o recolhimento da palha do campo passou a ser alvo de interesse econômico e trouxe à luz a necessidade de entendimento a respeito dos efeitos que a retirada poderia trazer ao sistema solo-planta. Isso porque, a manutenção da palha, que ocorre na ordem de 10–20 t ha<sup>-1</sup> na base seca, a depender da variedade plantada, da produtividade local e das condições edafoclimáticas (Leal et al., 2013) pode trazer benefícios como a redução nos níveis de erosão, o aumento na infiltração e no armazenamento de água, e a mineralização de nutrientes pela ciclagem, além do aumento nos estoques de carbono do solo (Peres et al., 2010; Cerri et al., 2011; Sousa et al., 2012; Trivelin et al., 2013). Por outro lado, também pode favorecer a incidência de pragas como a cigarrinha (Dorneles Jr. et al., 2015) e o *Sphenophorus levis* e prejudicar a brotação durante o inverno em áreas com temperaturas mais frias.

Vários grupos de pesquisa se debruçaram acerca do tema e a equipe da Embrapa Meio Ambiente também se dedicou a entender “quais os impactos da retirada parcial da palha sobre os rendimentos de colmos e sobre a sustentabilidade”. Nesse sentido, pesquisas foram conduzidas (Figura 1.12) e parte dos resultados compilados podem ser observados na Tabela 1.2, com informações quanto à produtividade de colmos para localidades distintas, variedades de cana, épocas de colheita e quantidades de palha retiradas após a colheita.



**Figura 1.12.** Imagens da colheita mecanizada com recolhimento simultâneo da palha, usando regulagens dos ventiladores do extrator primário e secundário e das áreas com manutenção total e retirada total da palha após a colheita.

Uma informação valiosa obtida foi a taxa média de palha gerada por TCH, que ficou em 16%, considerando a média dos valores máximos de palha e suas respectivas produtividades baseados no compilado da Tabela 1.2. Menandro et al. (2017) observaram uma taxa de 12% para um conjunto de experimentos com remoção de palha, mas usando variedades diferentes das estudadas na Tabela 1.2; indicando o efeito de genótipos nessa característica. Já com relação aos impactos da retirada da palha sobre o TCH, verificou-se diferenças de resposta entre locais. Naqueles com maiores déficit hídricos e solos argilosos, como Guaira, com clima tipo *Aw* (tropical de savana segundo classificação de Köppen), a retirada parcial alterou a produtividade de forma negativa. Por sua vez, em locais cujo déficit é menos expressivo e os solos são muito argilosos, como Araras e Iracemápolis, com clima *Cfa* (subtropical úmido segundo classificação de Köppen), não houve diferenças. A literatura mostra resultados variados de TCH em função de locais (Carvalho et al., 2017) e déficit hídrico (Marin et al., 2014; Oliveira et al. 2016), confirmando que as produtividades são dependentes das condições edafoclimáticas, de restrições bióticas e abióticas que possam ocorrer em cada local e da idade do canavial.

Um dos maiores benefícios da palha envolve, justamente, melhorias na infiltração e no maior armazenamento de água no solo, seus efeitos sobre a produtividade eram esperados em áreas cujas condições de clima poderiam afetar mais fortemente esses fatores (Peres et al., 2010), como ocorreu no clima *Aw*. A variação na produtividade nos diferentes locais avaliados sinaliza que há necessidade de cuidados na adoção dessa prática e que em locais com altas probabilidade de déficit hídricos o risco de perdas é elevado, mas que ainda assim, existe potencial de recolhimento da palha sem danos ao TCH em áreas de clima mais constante e mesmo para temperaturas mais baixas.

**Tabela 1.2.** Compilado de valores de rendimento de colmos de cana-de-açúcar (TCH) obtidos em experimentos conduzidos em diferentes localidades, variedades de cana, épocas de colheita e quantidades de palha mantidas após a colheita.

<i>Pesquisa conduzida entre 2010 e 2013 - Araras, SP (Usina São João) variedade RB 84-5210, latossolo com 77% de argila; colheita mecanizada da cana no meio da safra (agosto); distribuição manual da palha.</i>						
Média palha (base seca)	0 t ha <sup>-1</sup>	3,3t ha <sup>-1</sup>	6,6t ha <sup>-1</sup>	10t ha <sup>-1</sup>	13,4t ha <sup>-1</sup>	Equação ns - CV-8%
TCH acumulado 3 cortes	299*	288	304	304	300	
TCH médio	99	96	101	101	100	
<i>Pesquisa conduzida entre 2012 e 2013 - Itacemápolis, SP (Usina Itacema), variedade CTC14, latossolo com 70% de argila; colheita mecanizada da cana no final da safra (novembro); distribuição manual da palha.</i>						
Média palha (base seca)	0 t ha <sup>-1</sup>	3,1 t ha <sup>-1</sup>	6,2 t ha <sup>-1</sup>	9,2 t ha <sup>-1</sup>	12,3 t ha <sup>-1</sup>	Equação ns - CV-13%
1ª soca	96	95	85	83	92	
<i>Pesquisa conduzida entre 2012 e 2017 - Guaíra, SP (Usina Açucareira Guaíra), variedade RB 86-7515, latossolo com 54% de argila; colheita mecanizada da cana no final da safra (outubro); distribuição mecanizada da palha, usando o os ventiladores do extrator primário e secundário.</i>						
Média palha (base seca)	0 t ha <sup>-1</sup>	3,3 t ha <sup>-1</sup>	8,2 t ha <sup>-1</sup>	11,0 t ha <sup>-1</sup>	15,7 t ha <sup>-1</sup>	Equação $Y=561 + 0,5x$ $r^2=0,96$ (**0,001 CV-5%)
TCH acumulado 6 cortes	489	500	502	516	530	
TCH médio	82	83	84	86	88	
<i>Pesquisa conduzida entre 2014 e 2020 - Guaíra, SP (Usina Açucareira Guaíra), variedade IAC 95-5000, latossolo com 63% de argila; colheita mecanizada da cana no meio da safra (agosto); distribuição mecanizada da palha, usando o os ventiladores do extrator primário e secundário.</i>						
Média palha (base seca)	0 t ha <sup>-1</sup>	5,2 t ha <sup>-1</sup>	9,1 t ha <sup>-1</sup>	14,3 t ha <sup>-1</sup>		Equação $Y=3987 + 1,25x - 0,009x^2$ $r^2=0,98$ (**0,01 - CV-7%)
TCH acumulado 6 cortes	397	434	437	431		
TCH médio	66	72	73	72		

\* Valores analisados na linha, por regressão, dentro de cada localidade.

Um questionamento que surgiu ao se observar o efeito do recolhimento da palha sobre o rendimento de colmos (Tabela 1.2), justamente nos ensaios com maior tempo de coleta (6 cortes), foi se os efeitos poderiam ser resultado de perdas na qualidade química do solo. A fim de entender essa questão, foram realizadas análises de mineralização da palha em campo (Figura 1.13). Os valores observados para o período de um ano agrícola (um corte) variaram entre 42 e 66% de mineralização, a depender do local e da variedade (Tabela 1.3). Verificou-se também a queda na relação C:N, com valores iniciais próximos de 100 chegando a 37, após uma safra e de 20 após duas safras. Assim, de maneira geral, poderia ser sugerido um valor médio de 54% para a mineralização dentro de uma safra e de 91% para a mesma palha mantida por duas safras.

Fotos: Nilza Patrícia Ramos



**Figura 1.13.** Imagens dos sacos de decomposição, acondicionados em campo, para estudos de mineralização da palha de cana-de-açúcar.

**Tabela 1.3.** Taxas de decomposição, valor da relação C:N, obtidos em experimentos conduzidos em diferentes localidades, variedades de cana, épocas de colheita e quantidades de palha mantidas após a colheita.

Variedade	% decomp	C:N inicial	C:N final	dias	Local	Referência
<i>RB 86-7517</i>	42-58	100	-	310	Guaíra, SP	Ramos et al., 2015
<i>CTC14</i>	49-59	-	-	283	Iracemápolis, SP	Stancate et al., 2015
<i>RB 84-5210</i>	66	100	37	282	Araras, SP	Ramos et al., 2016
<i>IAC 95-5000</i>	58	96	39	320	Guaíra, SP	Ferreira, 2017
<i>RB 84-5210</i>	91	100	20	632	Araras, SP	Ramos et al., 2016

A mineralização da palha disponibiliza nutrientes no solo (Ceri et al., 2011; Trivelin et al., 2013; Carvalho et al., 2017) e incorpora C no sistema (La Scala et al., 2012; Tenelli et al., 2021), sendo que sua retirada pode representar menor sustentabilidade da produção no tempo, principalmente em solos com textura mais arenosa (Tenelli et al., 2021). A estabilização do C no solo tende a ser lenta devido à elevada relação C/N da palha (Tabela 1.3). Em Guaíra, SP, com a variedade IAC 95-5000 (Tabela 1.2), não foi possível verificar alteração na concentração de C no solo nas camadas 0-5 e 5-10 cm de profundidade, que apresentaram valores médios de, respectivamente, 19,45 e 16,79 g kg<sup>-1</sup> de C. Nesse caso, houve manejo de diferentes quantidades de palha no sistema, durante quatro cortes consecutivos. O nitrogênio, entretanto, nesse mesmo experimento, aumentou linearmente com a quantidade de palha mantida sobre solo (Figura 1.14).

No limite, a reciclagem do N com ajuda da palha contribui para o aumento do potencial de fornecimento de N no sistema, seja para suprir parcialmente a demanda da cultura em curto ou longo prazo (Robertson; Thorburn, 2007; Ferreira et al. 2015), seja para estabilizar maior proporção de C no solo, a fim de alcançar metas de sequestro de C importantes para o setor, para a economia e para o equilíbrio climático global (Groenigen et al., 2017).

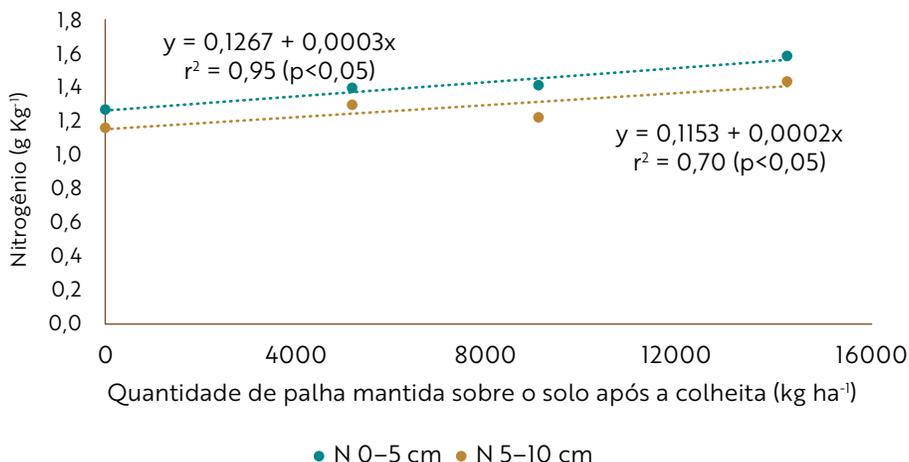


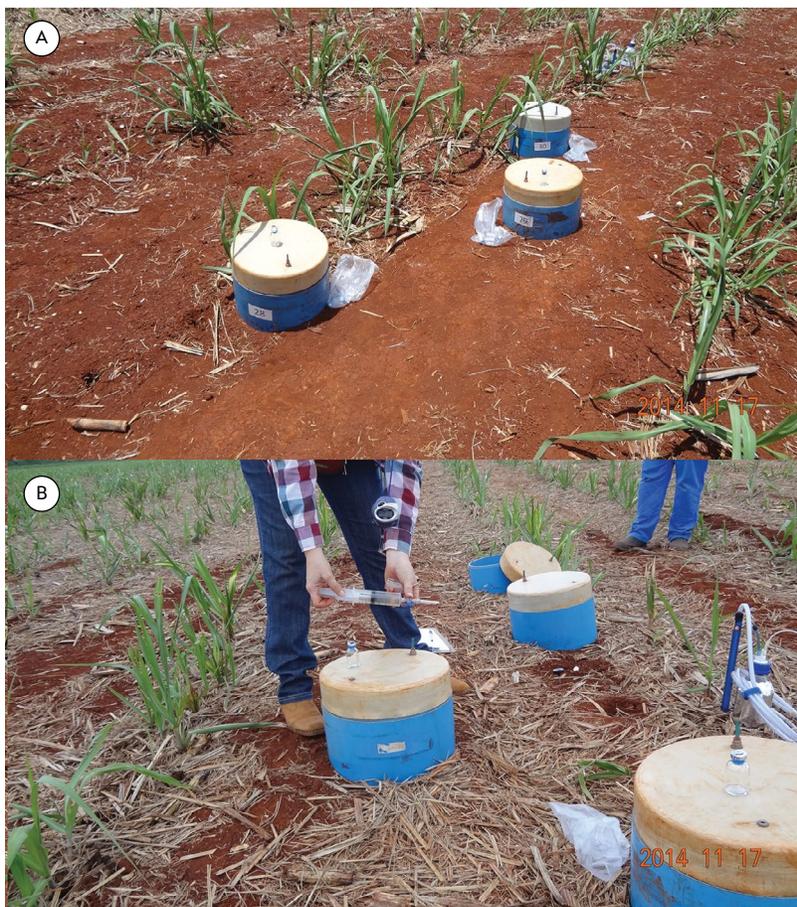
Figura 1.14. Nitrogênio observado nas camadas 0-5 e 5-10 cm de profundidade em análise realizada na terceira soca da variedade IAC95-5000, com manutenção de diferentes níveis de palha de cana-de-açúcar após a colheita (Guaíra, SP).

A respeito da mineralização dos demais nutrientes que podem ser ciclados com ajuda da palha, segue na Tabela 1.4, um compilado dos resultados de análises de fertilidade do solo para os mesmos ensaios da Tabela 1.2. Nota-se, que a retirada parcial da palha não alterou significativamente os níveis de P (fósforo), K (potássio), Ca (cálcio), Mg (magnésio) do solo na camada 0-20 cm de profundidade, após cortes sucessivos da cana. Com isso, entende-se que a continuidade do uso das recomendações direcionadas à cana-crua pode atender em parte as áreas com retirada parcial de palha; considerando que os níveis de nitrogênio se reduzem (Figura 1.14) e que há necessidade de reposição adicional do N na forma de fertilizante mineral, em médio-longo prazos.

Tabela 1.4. Resultados de análises de fertilidade do solo de três experimentos realizados com manutenção de diferentes quantidades de palha mantidas sobre o solo após a colheita, por socas sucessivas. Médias obtidas após análise de variância e teste Tukey, entre níveis de palha dentro de cada local.

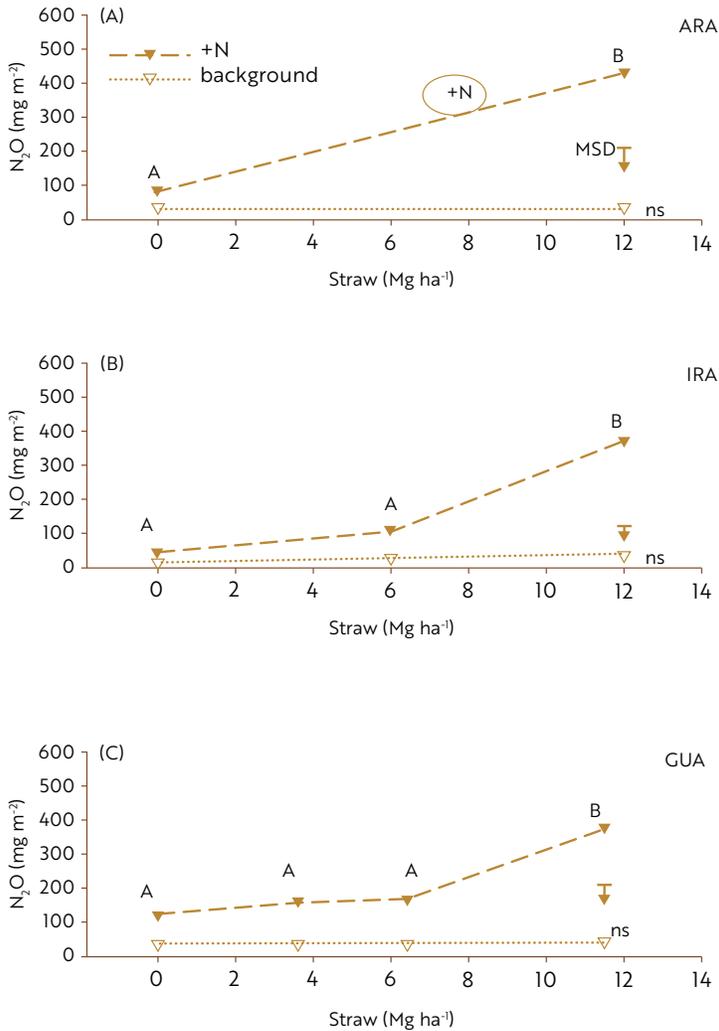
Local	Variedade	M.O	pH	P	K	Ca	Mg	CTC
				mg dm <sup>3</sup>	mmolc dm <sup>3</sup>			
Araras, SP	RB 84-5210	30,7	4,8	21,8	2,09	28,8	14,4	96
Guaíra, SP	RB 86-7517	-	5,2	3,60	0,61	25,2	5,2	62
Guaíra, SP	IAC 95-5000	-	5,6	14,2	1,2	34,2	8,7	78

Ainda a respeito da mineralização do nitrogênio vindo da palha, ao mesmo tempo que contribui para o enriquecimento químico do solo e para o uso pelas plantas, também pode aumentar as emissões de GEE. Procurando elucidar esse efeito ambiental, foram conduzidos experimentos de quantificação de emissões de GEE em áreas com diferentes recolhimentos de palha (Figura 1.15). Para óxido nitroso ( $N_2O$ ), verificou-se, em coletas realizadas nas safras 2012–2013 e 2014–2015, que há aumento das emissões acumuladas nas áreas em que se usou fertilizante nitrogenado associado à manutenção do solo com quantidades de palha superiores a  $8 t ha^{-1}$  (base seca) (Figura 1.16).



Fotos: Ana Paula C. Packer

Figura 1.15. Imagens de coletas de GEE em áreas sem recolhimento de palha (A) e com recolhimento de palha após a colheita (B).



\*A barra vertical indica diferença significativa mínima - MSD do teste de Tukey ( $< 0,05$ ) ( $n = 4$ ). Diferentes letras maiúsculas diferem significativamente (Tukey  $p \leq 0,05$ ).

ns Não significativo.

**Figura 1.16.** Emissão cumulativa de  $N_2O$  proveniente da aplicação de fertilizantes nitrogenados, associados à remoção (oST) e manutenção de diferentes níveis de palha (ST), comparado com as emissões de fundo sem aplicação de fertilizantes. (Coletas realizadas nas safras 2012–2013 e 2014–2015, em áreas de cultivo de cana-de-açúcar nos municípios de: (A) Araras, SP (ARA), (B) Iracemópolis, SP (IRA) e (C) Guaiará, SP (GUA), sob solo com 62 a 70% de argila e declividade inferior a 4%).

O grande conjunto de dados levantados indica a tendência de intensificação nas emissões de  $N_2O$ , quando se associa a adubação (em superfície) nitrogenada mineral com a permanência da palha sobre o solo. Essa elevação pode ser da ordem de nove a 14 vezes em relação às áreas sem palha. Isso se deve à maior atividade microbiana, favorecida pela elevada disponibilidade de carbono e maior umidade que se mantém com as camadas elevadas da palha protegendo o solo. Mesmo nesse cenário, os valores apontam para um fator de emissão  $N_2O$  de 0,54%, que está abaixo do indicado pelo IPCC, ou seja, de 1% do total de N mineral aplicado emitido na forma de  $N_2O$  (Calvo Buendia et al., 2019).

De forma geral, a retirada da palha como uma prática agrícola deve ser realizada com atenção em áreas de déficit hídrico; nos demais locais, o uso pode ser recomendado com alguma cautela, pois mesmo não sendo verificados prejuízos ao rendimento de colmos, há um potencial de desequilíbrio na matéria orgânica do solo em longo prazo. Com efeito, o produtor deve ter ciência que ao longo dos ciclos precisará repor o nitrogênio que sai com a palha recolhida e poderia ser incorporado na área pela mineralização. O equilíbrio entre custos e benefícios dessa prática depende também do mercado; considerando o valor do fertilizante a ser repostado, da operação de recolhimento e do preço da palha.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo da última década, a equipe de pesquisa com cana-de-açúcar da Embrapa Meio Ambiente e seus parceiros entregaram resultados de pesquisa que subsidiam decisões do setor sucroenergético, compõem políticas públicas e inspiram produtores e empreendedores a adotar práticas agrícolas mais sustentáveis. A redução no volume de material propagativo para cana-de-açúcar promovida pelo uso das gemas individualizadas; um período adicional de proteção contra déficit hídrico na implantação em campo promovido pelo uso de inoculante biológico associado às mudas pré-brotadas; o potencial de adoção do preparo reduzido e plantio direto em canaviais sem restrições bióticas e edafoclimáticas; informações sobre o potencial de incorporação de carbono e nitrogênio ao solo, na reforma do canavial, com o uso de leguminosas de cobertura; a manutenção da produtividade acrescida dos benefícios ambientais que envolvem menores emissões de gases de efeito estufa, a incorporação de nitrogênio ao sistema promovidos com o manejo da palhada são algumas contribuições para a sustentabilidade do sistema produtivo da cana para a economia do país e para o alinhamento com a pauta global de combate às mudanças climáticas.

A necessidade de ajustes de manejo, de inovação e de uma agenda estratégica para o setor sucroenergético são fundamentais para a manutenção de produtividades competitivas da cana-de-açúcar, num cenário de desafios climáticos intensos,

mudança na consciência de consumo, demanda crescente por fontes renováveis de energia e presença de uma nova estrutura de governança, que preza pelo social e pelo ambiental. Nesse sentido, este capítulo permitiu uma revisão aos resultados, contribuições e avanços realizados pela ou com a participação da Embrapa Meio Ambiente, que melhoraram a percepção quanto às ações prioritárias, aguçando o olhar para o futuro e para uma agricultura que projete o Brasil como exemplo mundial sustentável no setor.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Painel dinâmico do Lastro de Emissões de CBIOS**: período de tempo considerado: jan2020-jan2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-dinamicos-do-renovabio/painel-dinamico-da-cbio>. Acesso em: 26 fev. 2024.
- ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A. J. Características de alguns adubos verdes de interesse para a conservação e recuperação de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, n. 2, p. 175-185, 1995.
- AMBROSANO, E. J.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G. M. B.; SCHAMMAS, E. A.; DIAS, F. L. F.; ROSSI, F.; TRIVELIN, P. C. O.; MURAOKA, T.; ACHS, R. C. C.; AZCÓN, R. Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas. **Bragantia**, v. 70, n. 4, p. 810-818, 2011.
- BRASIL. Lei nº 13576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 27 dez. 2017. Seção I, p. 4.
- BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Valor bruto da produção nacional: 2022**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias-2022/valor-da-producao-agropecuaria-de-2022-esta-estimado-em-r-1-241-trilhao-1>. Acesso em: 16 jan. 2023.
- CABRAL, O. M. R.; RAMOS, N. P.; PACKER, A. P. C.; ANDRADE, C. A. de; FREITAS, H. C. de; PIRES, C. Emissões de CO<sub>2</sub> observadas durante a reforma de canavial. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 10., 2016, Ribeirão Preto. **Trabalhos apresentados...** Ribeirão Preto: STAB, 2016. p. 345-348.
- CALVO BUENDIA, E.; TANABE, K.; KRANJC, A.; BAASANSUREN, J.; FUKUDA, M.; NGARIZE S.; OSAKO, A.; PYROZHENKO, Y.; SHERMANAU, P.; FEDERICI, S. (ed.). **2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: volume 4: agriculture, forestry and other land use**. Geneve: IPCC, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>. Acesso em: 16 jan. 2023.
- CAPAZ, R. S.; CARVALHO, V. S. B.; NOGUEIRA, L. A. H. Impact of mechanization and previous burning reduction on GHG emissions of sugarcane harvesting operations in Brazil. **Applied Energy**, v. 102, p. 220-228, 2013.
- CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIROL, R. C.; MENANDRO, L. M. S.; BORDONAL, R. O.; BORGES, C. D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. **Global Change Biology and Bioenergy**, v. 9, n. 7, p. 1181-1195, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12410>.
- CASAGRANDE, A. A.; VASCONCELOS, A. C. M. Fisiologia da parte aérea. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A.. (ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. p. 57-78.
- CERRI, C. C.; GALDOS, M. V.; MAIA, S. M. F.; BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; POWLSON, D.; CERRI, C. E. P. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. **European Journal of Soil Science**, v. 62, p. 23-28, 2011. Special issue: soil organic matters.

CHERUBINI, F. The biorefinery concept: using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, v. 51, n. 7, p. 1412-1421, 2010.

COELHO, M. S.; MENDONÇA, E. S.; LIMA, P. C.; GUIMARÃES, G. P.; CARDOSO, I. M. Qualidade da matéria orgânica de solos sob cultivo de café consorciado com adubos verdes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 6, p. 1576-1586, 2013.

CONAB. **Perfil do setor do açúcar e do etanol no Brasil**: edição para a safra 2015/16. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/perfil-do-setor-sucroalcooleiro>. Acesso em: 4 mar. 2020.

CONAB. **Séries históricas das safras: área total**: 2021. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 18 jan. 2022.

CONAB. **Séries históricas das safras: agrícola**. 2017/21. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 4 mar. 2021.

CURY, T. N.; DE MARIA, I. C.; BOLONHEZI, D. Biomassa radicular da cultura de cana-de-açúcar em sistema convencional e plantio direto com e sem calcário. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 6, p. 1929-1938, 2014.

DE LUCA, E. F.; FELLER, C.; CERRI, C. C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D. C.; MANEQUINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com e sem queima de canavial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 2, p. 789-800, 2008.

DIAS, R. M.; RAMOS, R.; FERREIRA, T. E.; VIDAL, T. A.; ROSSI, P.; ALVES, R. P.; GOMES, G. V.; RAMOS, N. P. Acúmulo de nitrogênio na cana-de-açúcar após duas socas cultivadas com diferentes níveis de palha na região de Guaíra, SP. In: WORKSHOP AGROENERGIA, 10., 2016, Ribeirão Preto. **Matérias primas**: anais. Ribeirão Preto: IAC, 2016. 7 p.

DORNELES JUNIOR, J.; ALVES, R. P.; SANTOS, R. M. dos; RAMOS, R.; RAMOS, N. P.; PRADO, S. S. Influência da quantidade de palhada em cana-de-açúcar na população de *Mahanarva fimbriolata* (Stål, 1854) (Hemiptera: Cercopidae). In: WORKSHOP AGROENERGIA, 9., 2015, Ribeirão Preto. **Matérias primas**: anais... Ribeirão Preto: Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, 2015. RE 088. 7 p.

FAOSTAT. **Crop and livestock products**: data. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 29 de agosto de 2021.

FAVERO, C.; JUCKSCH, I.; ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M. Modificações na população de plantas espontâneas na presença de adubos verdes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 36, n. 11, p. 1355-1362, 2001.

FIGUEIREDO, P. Breve história da cana-de-açúcar e do papel do Instituto Agrônomo no seu estabelecimento no Brasil. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDELL, M. G. de A. (ed.). *Cana-de-açúcar*. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. p. 31-44.

FERREIRA, T. E. **Decomposição da palha de cana-de-açúcar em área de recolhimento variável sob adubação nitrogenada mineral ou inoculação com bactérias diazotróficas**. 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

FERREIRA, D. A.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; VITTI, A. C.; FORTES, C.; FARONI, C. E.; GARSIDE, A. L.; TRIVELIN, P. C. O. Contribution of N from green harvest residues for sugarcane nutrition in Brazil. *Global Change Biology Bioenergy*, v. 8, n. 5, p. 859-866, 2015.

FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L.; BÜLL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, n. 1, p. 49-57, 2006.

FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M.; DEBIASI, H.; TORRES, E. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52 p. (Embrapa Soja. Documentos, 327).

GROENIGEN, J. W. van; KESSEL, C. van; HUNGATE, B. A.; OENEMA, O.; POWLSON, D. S.; GROENIGEM, K. J. van. Sequestering soil organic carbon: a nitrogen dilemma. *Environmental Science and Technology*, v. 51, n. 9, p. 4738-4739, 2017.

GROVER, M.; ALI, S. Z.; SANDHYA, V.; RASUL, A.; VENKATESWARLU, B. Role of microorganisms in adaptation of agriculture crops to abiotic stresses. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 27, n. 5, p. 1231-1240, 2011.

KAVAMURA, V.; SANTOS, S. N.; SILVA, J. L. da.; PARMA, M. M.; AVILA, L. A.; VISCONTI, A.; ZUCCHI, T. D.; TAKETANI, R. G.; ANDREOTE, F. D.; MELO, I. S. de. Screening of Brazilian cacti rhizobacteria for plant growth promotion under drought. *Microbiological Research*, v. 168, n. 4, p. 183-191, 2013.

LA SCALA JUNIOR, N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G.T. Short-term soil CO<sub>2</sub> emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 91, n. 1-2, p. 244-248, 2006. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.still.2005.11.012>.

LA SCALA JUNIOR, N.; FIGUEIREDO, E. B.; PANOSSO, A. R. A review on soil carbon accumulation due to the management change of major Brazilian agricultural activities. *Brazilian Journal of Biology*, v. 72, n. 3, p. 775-785, 2012. Supplement.

LANDELL, M. G. A.; CAMPANA, M. P.; FIGUEIREDO, P. **Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB), oriundas de gemas individualizadas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2012. 16 p. (Documentos IAC, 109).

LEAL, M. R. L. V.; WALTER, A. S.; SEABRA, J. E. A. Sugarcane as an energy source. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 3, n. 1, p. 17-26, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13399-012-0055-1>.

MADARI, B. E.; CUADRA, S. V.; OLIVEIRA, P. P. A.; HIGA, R. C. V.; RAMOS, N. P.; ANDRADE, C. A. de; KEMENES, A.; GONDIM, R. S. O papel da agricultura na mitigação das emissões de gases de efeito estufa. In: CUADRA, S. V.; HEINEMANN, A. B.; BARIONI, L. G.; MOZZER, G. B.; BERGIER, I. (ed.). **Ação contra a mudança global do clima: contribuições da Embrapa**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. p. 90-106. E-book. (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, 13).

MAY, A.; RAMOS, N. P. **Uso de gemas individualizadas de cana-de-açúcar para a produção de mudas pré-brotadas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2019. 29 p. (Embrapa Meio Ambiente. Circular Técnica, 29).

- MAY, A.; RAMOS, N. P.; SANTOS, M. de S. dos; SILVA, E. H. F. M. da; MELO, I. S. de **Promoção de crescimento de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar inoculadas com *Bacillus aryabhattai* em diferentes frequências de irrigação**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2019. 27 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 80).
- MAY, A.; SANTOS, M. de S. dos; SILVA, E. H. F. M. da; VIANA, R.S.; VIEIRA JR, N.A.; RAMOS, N.P.; MELO, I.S. Effect of *Bacillus aryabhattai* on the initial establishment of pre-sprouted seedlings of sugarcane varieties. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, e11510212337, 2021.
- MARIN, F.; THORBURN, P.; COSTA, L. G., OTTO, R. Simulating long-term effects of trash management on sugarcane yield for Brazilian cropping systems. **Sugar Tech**, v. 16, n. 2, p. 164-173, 2014
- MENANDRO, L. M. S.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J.; KÖLL, O. T.; PIMENTA, M. T. B.; SANCHES, G. M.; RABELO, S. C.; CARVALHO, J. L. N. Comprehensive assessment of sugarcane straw: implications for biomass and bioenergy production. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 11, n. 3, p. 488-504, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/bbb.1760>.
- NASER, V.; SHANI, E. Auxin response under osmotic stress. **Plant Molecular Biology**, v. 91, n. 6, p. 661-672, 2016.
- OLIVEIRA, A. P. P.; THORBURN, P. J.; BIGGS, J. S.; LIMA, E.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; ZANOTTI, N. E. The response of sugarcane to trash retention and nitrogen in Brazilian coastal tableland: a simulation study. **Experimental Agriculture**, v. 52, n. 1, p. 69-86, 2016.
- OTTO, R.; SILVA, A. P.; FRANCO, H. C. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, v. 117, p. 201-210, 2011.
- PARK, Y.-G.; MUN, B.-G.; KANG, S.-M.; HUSSAIN, A.; SHAHZAD, R.; SEO, C.-W.; KIM, A.-Y.; LEE, S.-U.; OH, K. Y.; LEE, D. Y.; LEE, I.-J.; YUN, B.-W. *Bacillus aryabhattai* srbo2 tolerates oxidative and nitrosative stress and promotes the growth of soybean by modulating the production of phytohormones. **PLOS ONE**, v. 12, n. 3, p. e0173203, 2017.
- PEREIRA, G. S.; MAHL, D.; SOUZA, C. H. W.; PRAMPERO, V. Efeito do cultivo de *Crotalaria juncea* em rotação com cana-de-açúcar sobre parâmetros físicos do solo. **Journal of Agronomic Sciences**, v. 6, n. esp., p. 1-12, 2017.
- PERES, J. G.; SOUZA, C. F.; LAVORENTI, N. A. Avaliação dos efeitos da cobertura de palha da cana-de-açúcar. **Engenharia. Agrícola**, v. 30, n. 5, p. 875-886, 2010.
- PERIN, A.; SANTOS, R. H. S.; URQUIAGA, S.; GUERRA, J. G. M.; CECON, P. R. Produção de fitomassa, acúmulo de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio por adubos verdes em cultivo isolado e consorciado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 1, p. 35-40, 2004.
- RAMAIAH, B.; RAO, G. N.; PRASAD, G. Elimination of internodes in sugarcane seed piece. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 16., 1977, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: ISSCT, 1977. p. 1509-1513.
- RAMOS, N. P.; YAMAGUCHI, C. S.; PIRES, A. M. M.; ROSSETTO, R.; POSSENTI, R. A.; PACKER, A. P. C.; CABRAL, O. M. R.; ANDRADE, C. A. de. Decomposição de palha de cana-de-açúcar recolhida em diferentes níveis após a colheita mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1492-1500, 2016.

- RAMOS, R.; STANCATTE, R. S.; VIEIRA, H. B.; ROSSI, P.; DEGASPARI, I. A. M.; GOMES, G. V.; RAMOS, N. P. Dinâmica de decomposição de palha sob taxas variadas de recolhimento em canavial de segunda soca - Guaira, SP. In: WORKSHOP AGROENERGIA, 9., 2015, Ribeirão Preto. **Matérias primas: anais**. Ribeirão Preto: Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, 2015. RE 062. 7 p.
- RESENDE, A. S.; XAVIER, R. P.; QUESADA, D. M.; COELHO, C. H. M.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; GUERRA, J. G. M.; URQUIAGA, S. **Incorporação de leguminosas para fins de adubação verde em pré-plantio de cana-de-açúcar**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2000. 18 p. (Embrapa Agrobiologia. Documentos, 124).
- ROBOTHAN, B. G.; CHAPPELL, W. G. High quality planting billets-whole-satlk planters billets compared to billets from modified and unmodified harvester. **Proceedings of the Australian Society Sugar Cane Technologists**, v. 24, p. 1-10, 2002.
- ROBERTSON, F. A.; THORBURN, P. J. Decomposition of sugarcane harvest residue in different climatic zones. **Australian Journal of Soil Research**, v. 45, n. 1, p. 1-11, 2007.
- ROSSETTO, R.; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; MELLIS, E. V.; VARGAS V. P.; CANTARELLA H.; PRADO, H.; DIAS, F. L. F.; LANDELL, M. G. A.; BRANCALIÃO, S. R.; GARCIA, J. C. Cana-de-açúcar: cultivo com sustentabilidade. **Informações Agrônomicas**, v. 142, p. 1-13, 2013.
- SANTOS, F. A.; QUEIROZ, J. H.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. Revisão. **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000500025>.
- SILVA, J. A. A.; VITTI, G. C.; STUCHI, E. S.; SEMPIONATO, O. R. Reciclagem e incorporação de nutrientes ao solo pelo cultivo intercalar de adubos verdes em pomar de laranja-‘Pêra’. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 24, n. 1, p. 225-230, 2002.
- SOUZA, G. B.; MARTINS FILHO, M. V.; MATIAS, S. Perdas de solo, matéria-orgânica e nutrientes por erosão hídrica em uma vertente coberta com diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar em Guariba, SP. **Engenharia. Agrícola**, v. 32, n. 3, p. 490-500, 2012.
- STANCATTE, R. S.; RAMOS, R.; MORAES, G. C.; ROSSI, P.; VIEIRA, H. B.; ROSSETTO, R.; PACKER, A. P. C.; RAMOS, N. P. Decomposição de palha de cana-de-açúcar em cultivo de primeira soca - Iracemápolis, SP. In: WORKSHOP AGROENERGIA, 9., 2015, Ribeirão Preto. **Matérias primas: anais**. Ribeirão Preto: Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios, 2015a. RE 063. 7 p.
- STANCATTE, R. S.; VIEIRA, H. B.; SOUZA, D. T.; MELO, I. S. de; RAMOS, N. P. Uso de bactérias tolerantes à seca em mudas de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 9., 2015, Campinas. **Anais...** Campinas: Instituto Agrônomico, 2015b. RE Nº 15422. 8 p.
- TAVARES, O. C. H.; LIMA, E.; ZONTA, E. Crescimento e produtividade da cana planta cultivada em diferentes sistemas de preparo do solo e de colheita. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 61-68, 2010.
- TENELLI, S.; BRODONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P.; CARVALHO, J. N. Multilocation changes in soil carbon stocks from sugarcane straw removal for bioenergy production in Brazil. **GCB Bioenergy**, v. 13, n. 7, p. 1099-1111, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12832>.

TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; VITTI, A. C.; FORTES, C.; FARONI, C. E.; OLIVEIRA, E. C. A.; CANTARELLA, H. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. *Scientia Agricola*, v. 70, n. 5, p. 345-352, 2013.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA. **Protocolo agroambiental**: números do setor. Disponível em: <https://unica.com.br/iniciativas/protocolo-agroambiental/>. Acesso em: 20 jun. 2021.

XAVIER, M. A.; LANDELL, M. G. de A.; CAMPANA, M. P.; FIGUEIREDO, P.; MENDONÇA, J. R. de; DINARDO-MIRANDA, L. L.; SCARPARI, M. S.; ANJOS, I. A. dos; AZANIA, C. A. M.; BRANCALÃO, S. R.; KANTHACK, R. A. D.; AFERRI, G.; SILVA, D. N. da; BIDÓIA, M. A. P.; CAMPOS, M. F. de; PERRUCO, D.; MATSUO, R. S.; NEVES, J. C. T.; CASSANELI JÚNIOR, J. R.; PERRUCO, L.; PETRI, R. H.; SILVA, T. N. da; SILVA, V. H. P. da; THOMAZINHO JÚNIOR, J. R.; MIGUEL, P. E. M.; LORENZATO, C. M.; GARCIA, J. C. **Fatores de desuniformidade e kit de pré-brotação IAC para sistema de multiplicação de cana-de-açúcar - mudas pré-brotadas (MPB)**. Campinas: Instituto Agronômico, 2014. 23 p. (Documentos IAC, 113).

# ADEQUAÇÃO AGROAMBIENTAL DA PROPRIEDADE RURAL

*Ladislau Araújo Skorupa, José Felipe Ribeiro e Celso Vainer Manzatto*

## INTRODUÇÃO

Por adequação agroambiental de uma propriedade ou posse rural entende-se a adoção de um conjunto de condutas e práticas inter-relacionadas que buscam conciliar a produção agropecuária com a proteção e o uso sustentável dos recursos bióticos e abióticos ali presentes, aliada com a sanidade da produção, a saúde e o bem-estar do ser humano.

A ocupação da terra para uso agrícola, pecuário ou florestal, transformando um ecossistema natural em agroecossistema, traz consigo um potencial de geração de impactos ambientais sobre o solo, água e componentes bióticos do agroecossistema. Esses impactos se devem às atividades inerentes a essa transformação, como, por exemplo, pela substituição de parte da cobertura vegetal nativa para uso alternativo, o preparo do solo e a condução das atividades produtivas em conjunto com a gestão das áreas naturais remanescentes. A forma e as implicações de como isso ocorre depende tanto das expectativas quanto das decisões dos produtores sobre o uso e ocupação de suas terras, com reflexos ambientais e socioeconômicos internos e externos à unidade de produção. Dessa forma, há necessidade de serem consideradas as aptidões e a capacidade de suporte de cada porção da propriedade, buscando-se evitar impactos ambientais indesejáveis.

Efeitos da gestão inadequada das atividades nesses espaços têm sido amplamente relatados na literatura, relacionando-os às perdas de solos por processos erosivos (Araújo et al., 2005; Hernani et al., 2002; Bertoni; Lombardi Neto, 2008) e suas implicações sobre a disponibilidade, assoreamento e contaminação de recursos hídricos, perda de biodiversidade, maiores emissões de gases de efeito estufa (GEE), entre outros (Silva et al., 2011; Pereira et al., 2015).

Por outro lado, a ocupação seguida de uma gestão adequada desses espaços propicia a provisão de diferentes benefícios denominados serviços ecossistêmicos (SE). Uma referência dessa abordagem é dada pela publicação “Millennium Ecosystem Assessment” (2005), que define SE como os benefícios que o homem obtém dos ecos-

sistemas, classificando-os em quatro categorias: suporte, provisionamento, regulação e culturais (Figura 2.1). Nessa classificação, as atividades agropecuárias se apresentam não apenas como produtoras de alimentos, fibras e energia, mas também participando da oferta de outros importantes SE, como na ciclagem de nutrientes, mitigação de GEE, conservação e proteção do solo, entre outros. A contribuição ativa feita por ações do proprietário ou possuidor por meio da adoção de práticas sustentáveis quanto ao uso da terra, do manejo dos ecossistemas naturais e da modelagem da paisagem para a continuidade dos processos ecológicos e a provisão de serviços ecossistêmicos é reconhecida como prestação de serviços ambientais (SA) (Muradian et al., 2010). Uma abordagem conceitual de serviços ecossistêmicos e as relações com a agricultura são tratados no “Marco Referencial em Serviços Ecossistêmicos” por Ferraz et al. (2019).

O melhor entendimento das inter-relações das atividades agropecuárias com os componentes do ambiente natural também fortaleceu a percepção das implicações desses impactos na produção agropecuária, revelando que a conservação do capital natural é o fator chave para a garantia da sustentabilidade das atividades produtivas (Constanza et al., 1997). Da mesma forma, é consenso que as externalidades negativas ou positivas delas decorrentes repercutem não apenas na propriedade, mas, direta ou indiretamente, em maior ou menor grau, em diferentes escalas geográficas. Trata-se, portanto, de uma das facetas do conceito de multifuncionalidade da agricultura e da paisagem rural, em que parte dos serviços ofertados apresenta características de externalidades e de bens públicos (Organisation for Economic Co-Operation and Development, 2001; Chiodi; Marques, 2018; De Carli et al., 2018; Sousa; Paula, 2019; Toniolo et al., 2021).

Do ponto de vista de mercados, há pressões sobre a produção agropecuária no sentido de adequar seus processos produtivos a requisitos de sustentabilidade. Embora não seja um fato novo, atualmente tais pressões têm se intensificado, em especial, a partir dos desdobramentos das discussões em torno da mudança do clima, das contribuições das mudanças do uso do solo e da agropecuária no aumento das emissões de GEE (SEEG, 2022), e dos compromissos internacionais (voluntários ou não) assumidos pelo País em torno do tema. A exemplo disso, a inserção da discussão sobre produção sustentável no mundo corporativo tem se relacionado à denominada Agenda ESG (Environmental, Social, Governance), a qual trata das condutas adotadas pelas empresas com relação ao meio ambiente, responsabilidade social e governança (The World Bank, 2004).

No conjunto desses movimentos, tem havido importantes avanços na formulação e implementação políticas públicas relevantes, como da Lei de Proteção da Vegetação Nativa (LPVN), Lei nº 12.651/2012, também conhecida como o novo Código Florestal (Brasil, 2012b); da Política Nacional da Mudança do Clima, Lei 12.187 (Brasil, 2009);

do Plano ABC (Brasil, 2012d), do Plano ABC+ (Brasil, 2021b), e também de políticas correlatas, como a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais, Lei nº 14.119 (Brasil, 2021a).



## BIODIVERSIDADE

**Figura 2.1.** Categorias de serviços ecossistêmicos, considerando sua inserção em diversas escalas.  
Fonte: Adaptado de Millennium Ecosystem Assessment (2005)

Este capítulo aborda a adequação agroambiental da propriedade rural sob a perspectiva da gestão da paisagem, integrando a produção agropecuária – associada a boas práticas – com a conservação de áreas naturais, eliminando ou mitigando riscos e potencializando a oferta de serviços ecossistêmicos e ambientais. Dado que as contribuições desses componentes são difusas, a adequação agroambiental é discutida do ponto de vista legal acerca do uso e da ocupação das áreas da propriedade, assim como das previsões legais sobre as diferentes formas para a recuperação de áreas degradadas ou alteradas. Ao lado disso, também são discutidas a adoção de boas práticas agropecuárias (BPA), incluindo aspectos relacionados ao uso e manejo sustentável do solo e da água, e de processos tecnológicos sustentáveis relacionados à condução de culturas e criações.

## INSTRUMENTOS LEGAIS QUE REGULAM O USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

No que se refere a aspectos legais, um dos principais instrumentos que orientam e disciplinam o uso e ocupação do solo em uma propriedade rural é a Lei nº 12.651/2012 que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa (LPVN) (Brasil, 2012b), alterada em alguns pontos pela Lei nº 12.727/2012 (Brasil, 2012c), e regulamentada pelos Decretos Federais nº 7.830/2012 e 8.235/2014 (Brasil, 2012a; Brasil, 2014). Ao lado destes, estão os relacionados aos processos de licenciamento ambiental voltados para a atividades agropecuária, em especial a Resolução Conama nº 01 (Brasil, 1986a); Resolução Conama nº 237 (Brasil, 1997) e Lei Complementar Federal nº 140 (Brasil, 2011). Além desses outros merecem destaque, como a Política Nacional do Meio Ambiente (Brasil, 1981), da Lei de Crimes Ambientais (Brasil, 1998; Brasil, 2008), da lei que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (Brasil, 2000) e da lei de proteção da Mata Atlântica, Lei nº 11.428 (Brasil, 2006a).

## LEI DE PROTEÇÃO DA VEGETAÇÃO NATIVA (LPVN)

A LPVN (Brasil, 2012b) trouxe alguns avanços no que diz respeito à previsão de instrumentos voltados para o levantamento do estado de conservação da vegetação nativa no território brasileiro, especialmente, no nível da propriedade ou posse rural. Entre os instrumentos incorporados na nova lei no âmbito do Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente (SINIMA) está a criação do Cadastro Ambiental Rural (CAR) e do Programa de Regularização Ambiental (PRA) pelos órgãos ambientais estaduais, este último criando condições para que os estados orientem e acompanhem os produtores rurais na elaboração e implementação das ações necessárias

para a regularização de áreas com passivos ambientais nas suas propriedades ou poses rurais. Tais instrumentos permitirão que o Governo Federal e estados conheçam não apenas a localização de cada imóvel rural, como também o seu estado de adequação ambiental, agregando e integrando informações ambientais para uso no planejamento e monitoramento ambiental. Até agosto de 2022 já haviam sido cadastrados 6,7 milhões de imóveis rurais, somando uma área de 624,8 milhões de hectares (Serviço Florestal Brasileiro, 2022).

A Lei reconhece quatro categorias de ocupação na propriedade rural: Áreas de Preservação Permanente (APP), Áreas de Reserva Legal (ARL) e Áreas de Uso Restrito (AUR); as demais áreas da propriedade, não enquadradas como de APP e ARL configuram-se como Áreas de Uso Alternativo do Solo (AUA). Suas definições, bem como as condições para o seu uso e ocupação, conforme a referida lei, são apresentadas abaixo. A Figura 2.2 representa a concepção de uma propriedade rural típica, em que as categorias acima são apontadas.

A aplicação da lei em termos de permissividade de uso dessas áreas, assim como das dimensões mínimas a serem consideradas para fins de recomposição em caso da existência de passivos ambientais envolvem a aplicação dos conceitos de “área rural consolidada”, “pequena propriedade ou posse rural familiar” e “módulo fiscal” (BOX 1).

---

- Área rural consolidada: *área de imóvel rural com ocupação antrópica preexistente a 22 de julho de 2008, com edificações, benfeitorias ou atividades agrossilvipastoris, admitida, neste último caso, a adoção do regime de pousio (Brasil, 2012b);*

---

- Pequena propriedade ou posse rural familiar: Para efeito da Lei nº 12.651/2012, são consideradas pequenas propriedades aquelas com dimensões inferiores a quatro módulos fiscais e que desenvolvam atividades agrossilvipastoris, além de terras indígenas e de áreas de povos e comunidades tradicionais (Brasil, 2012b);

---

- Módulo fiscal: unidade de medida, em hectares, cujo valor é fixado pelo Inca para cada município levando-se em conta: (a) o tipo de exploração predominante no município (hortifrutigranjeira, cultura permanente, cultura temporária, pecuária ou florestal); (b) a renda obtida no tipo de exploração predominante; (c) outras explorações existentes no município que, embora não predominantes, sejam expressivas em função da renda ou da área utilizada; (d) o conceito de “propriedade familiar” (Brasil, 1979; Brasil, 2006b). A dimensão de um módulo fiscal varia de acordo com o município em que a propriedade está localizada. O valor do módulo fiscal no Brasil varia de 5 a 110 hectares (Figura 2.4).

---

► NACIONAL

►► REGIONAL

►►► BACIA HIDROGRÁFICA

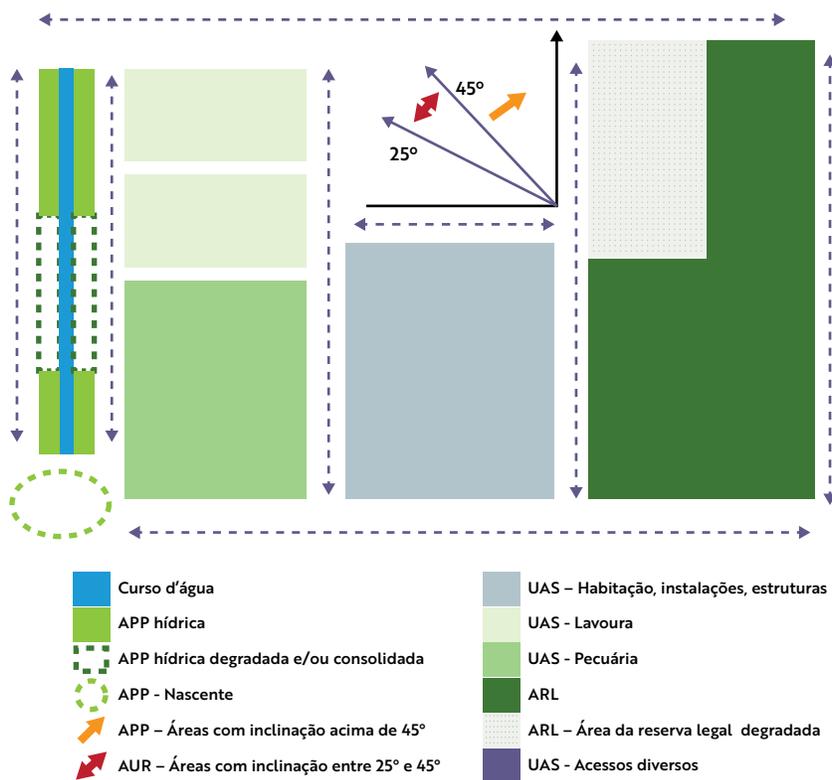


Figura 2.2. Configuração de uma propriedade rural típica e os principais tipos de uso e ocupação por categoria (APP – Área de Preservação Permanente; ARL – Área de Reserva Legal; AUR – Área de Uso Restrito; UAS – Uso Alternativo do Solo).

## ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE (APP)

Segundo a LPVN, APP são *áreas protegidas, cobertas ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas* (Brasil, 2012b). A definição de APP já incorpora os SE por elas ofertadas. Desse conjunto, do ponto de vista da produção agrícola, vale destacar a sua contribuição na proteção do solo e dos recursos hídricos, na garantia de oferta de água em quantidade e qualidade, bem como do seu papel nem sempre reconhecido no abrigo a organismos polinizadores e predadores naturais de pragas de culturas (Silva et al., 2011).

Os principais tipos de APP em uma propriedade rural incluem:

- i. as faixas marginais de qualquer curso d'água natural perene e intermitente (Figura 2.3A e 2.3B), cujas dimensões são definidas consoante a largura do curso d'água, a partir de sua calha regular, conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Dimensão da largura de APP fluviais de acordo com a LPVN.

Largura do curso d'água (m)	Largura da APP (m)
Até 10	30
Entre 10 e 50	50
Entre 50 e 200	100
Entre 200 e 600	200
Superior a 600	500

- ii. faixas marginais de veredas, cuja largura mínima deve ser de 50 metros em projeção horizontal, a partir do espaço permanentemente brejoso e encharcado (Figura 2.3D)
- iii. as áreas no entorno dos lagos e lagoas naturais em faixa com largura mínima de 50 metros para espelhos com área de até 20 ha; e de 100 metros para espelhos d'água com área superior a 20 hectares.
- iv. áreas no entorno dos reservatórios d'água artificiais decorrentes de represamento de cursos d'água naturais destinados ao abastecimento público ou a geração de energia, a largura mínima deve ser de 30 metros e a máxima de 100 metros.
- v. encostas ou partes dessas com declividade superior a 45° (Figura 2.3C).

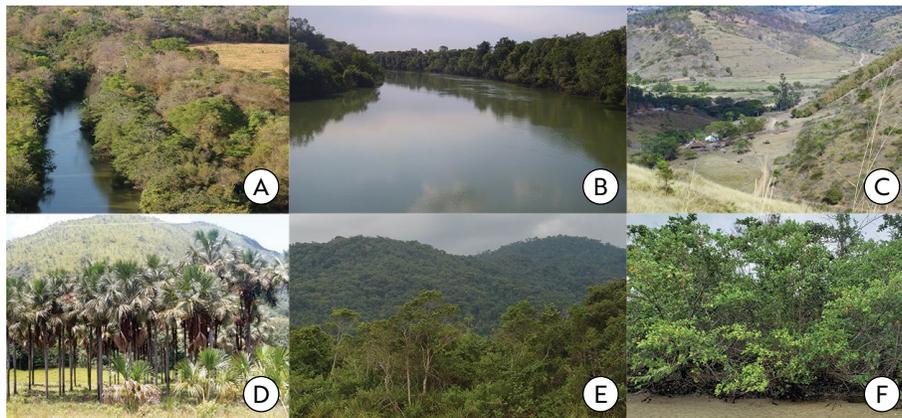
- vi. áreas no entorno das nascentes e dos olhos d'água perenes num raio mínimo de 50 metros.

Além desses tipos, também são consideradas APP áreas de restingas e manguezais (Figura 2.3E e 2.3F); bordas dos tabuleiros ou chapadas; topos de morro e áreas em altitude superior a 1.800 metros; e outras declaradas de interesse social pelo Poder Executivo (Art. 6), tais quais áreas destinadas a conter processos erosivos do solo, riscos de deslizamentos e enchentes, proteção de várzeas e outras áreas úmidas, abrigo da flora e fauna, entre outras (Art. 6).

A intervenção ou supressão de vegetação em APP é possível quando for configurado interesse social, de utilidade pública ou de baixo impacto ambiental. Em situações de interesse social em pequena propriedade ou posse rural – benefício extensivo à imóveis com até quatro módulos fiscais (Art. 3, parágrafo único), de povos e comunidades tradicionais –, destacam-se as seguintes atividades: (1) exploração agroflorestal, desde que não comprometa a função ambiental da área ou descaracterize a cobertura vegetal; (2) o plantio de culturas temporárias na porção exposta no período de vazante, desde que não comprometa a qualidade da água, a proteção da fauna e que não haja a supressão de vegetação nativa (Art. 4, parágrafo 5º).

De um modo geral, seja em pequena propriedade ou não, as principais atividades consideradas de interesse social que possibilitam a intervenções em APP são aquelas relacionadas ao combate ao fogo e proteção da vegetação nativa, a plantios, controle de processos erosivos e a extração de areia, cascalho, argila e saibro, desde que autorizadas pela autoridade competente.

Fotos: J.F. Ribeiro (A e D); L.A. Skorupa (B,C,E e F)



**Figura 2.3.** Algumas categorias de Áreas de Preservação Permanente: (A) e (B) faixas marginais de qualquer curso d'água natural (matas ciliares); (C) encostas ou partes destas com declividade superior a 45°; (D) faixas marginais de veredas; (E) restinga; (F) mangue.

Entre as atividades de utilidade pública, podem ser citadas obras de infraestrutura destinadas à proteção sanitária, transporte, energia, telecomunicações, de defesa civil, entre outros (Art. 3; Inciso VIII).

Por sua vez, com relação às atividades de baixo impacto ambiental, destacam-se a abertura de pequenos acessos internos para pessoas e animais, incluindo a obtenção de água e de produtos do manejo agroflorestal sustentável comunitário e familiar, como a extração de produtos não-madeireiros; ações de ecoturismo; acesso à embarcações; construção de cercas, entre outras, desde que não descaracterizem a vegetação ou comprometam a função ambiental da área (Art. 3, inciso X).

Além das previsões acima, também são permitidas atividades relacionadas à aquicultura em imóveis com até 15 módulos fiscais, desde que o imóvel cumpra as exigências legais, incluindo o seu registro junto ao CAR e aos devidos processos de licenciamento (Art. 4, parágrafo 6°).

No caso de áreas consolidadas em APP, são permitidas a continuidade das atividades agrossilvipastoris, de ecoturismo e de turismo rural, observando-se os critérios técnicos de conservação do solo e da água, não sendo permitidas novas conversões de área para uso alternativo nesses locais. Nessas situações, a adoção de boas práticas de conservação de solo deve ser observada, sob risco de ocorrência de processos erosivos e impactos sobre os recursos hídricos nas porções inferiores do terreno, como, por exemplo, de APP em áreas com declividade superior a 45°.

## ÁREA DE RESERVA LEGAL (ARL)

De acordo com a LPVN, reserva legal é uma área localizada no interior de uma propriedade ou posse rural [...], *com a função de assegurar o uso econômico de modo sustentável dos recursos naturais do imóvel rural, auxiliar a conservação e a reabilitação dos processos ecológicos e promover a conservação da biodiversidade, bem como o abrigo e a proteção de fauna silvestre e da flora nativa* (Brasil, 2012b). São áreas que ofertam não apenas SE de provisionamento, mas também de suporte e regulação, como os atribuídos às APP, e mesmo culturais (Figura 2.1).

A dimensão dessa área é definida em percentual da área da propriedade ou posse rural e dependente de sua localização geográfica. Em propriedades ou posses rurais localizadas na Amazônia Legal (Figura 2.4A), a ARL deverá ter as seguintes dimensões:

- 80% em áreas de florestas
- 35% em áreas de cerrado
- 20% em áreas de campos gerais

Na Amazônia Legal, em áreas de florestas, essas dimensões poderão ser reduzidas em até 50%, caso os estados tenham Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) aprovado ou a área seja ocupada por mais de 65% por unidades de conservação regulari-

zadas e terras indígenas homologadas. A Amazônia Legal ocupa cerca de 5 milhões quilômetros quadrados (km<sup>2</sup>), ou seja, cerca de 59% do território brasileiro. Nas demais regiões do Brasil, a ARL deverá ser de 20%.

Segundo a LPVN, a área de reserva legal de imóveis com até quatro módulos fiscais, independentemente de sua localização no Brasil, é aquela existente em 22 de julho de 2008.

As áreas de reserva legal são passíveis de exploração desde que de forma sustentável. De acordo com a LPVN, nas áreas de ARL, é permitida a livre coleta de produtos não madeireiros, como frutos, sementes, folhas, cascas, óleos, resinas, raízes – atendendo para os critérios estabelecidos quanto à frequência e volumes permitidos, e época de maturação de frutos e sementes, não colocando em risco a manutenção dos indivíduos e espécies exploradas (Art. 21).

O manejo florestal sustentável sem finalidade comercial, voltado para o consumo no próprio imóvel, não requer autorização do órgão ambiental competente. Nesse caso, há a necessidade de declaração, junto ao órgão ambiental, quanto ao motivo da exploração e do volume a ser explorado, não podendo exceder 20 metros cúbicos (m<sup>3</sup>) (Art. 23). No entanto, se a exploração florestal for voltada para fins comerciais, há a necessidade de elaboração e aprovação de um Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) pelo órgão ambiental. O referido PMFS deverá informar as técnicas de manejo a serem empregadas e as garantias de que serão asseguradas tanto a manutenção da diversidade das espécies e a reposição florestal, quanto a não descaracterização da cobertura vegetal (Art. 22 e 31).

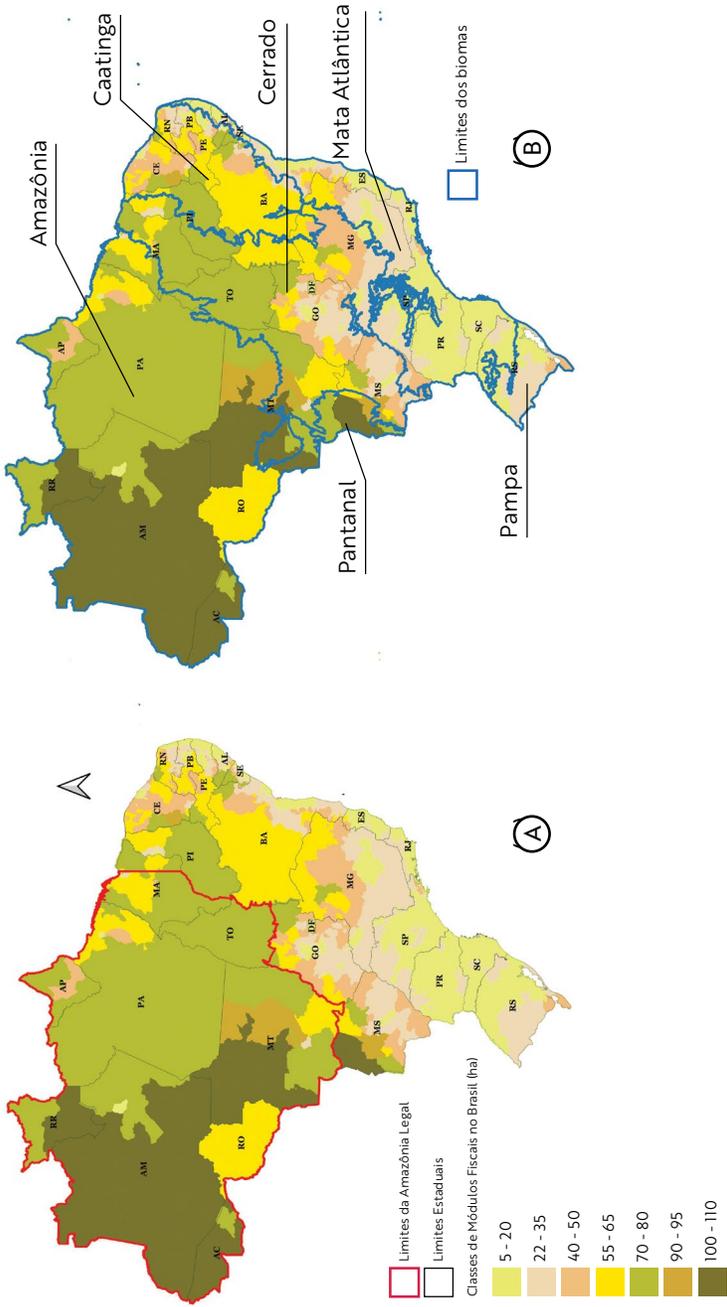


Figura 2.4. Distribuição de classes de módulos fiscais no Brasil e limites da Amazônia Legal (A) e dos biomas (B).  
Fontes: IBGE, 2017; INCRA, 2013.

## ÁREA DE USO RESTRITO (AUR)

As áreas de uso restrito constituem nova categoria de áreas protegidas reconhecidas pela LPVN, contemplando as áreas dos pantanais e planícies pantaneiras (Figura 2.5A e 2.5B), e também as áreas com inclinação entre 25° e 45° (Figura 5C).



Fotos: Sandra Santos (A e B); Marcelo Muller (C)

**Figura 2.5.** Exemplos de Áreas de Uso Restrito: (A) e (B) pantanais e planícies pantaneiras; (C) áreas com inclinação entre 25° e 45°.

Nas áreas de inclinação de 25° a 45° são permitidas as atividades agrossilvipastoris e o manejo florestal sustentável, seguindo orientações de órgãos de pesquisa quanto à adoção de boas práticas agropecuárias. São áreas sensíveis, cuja exploração requer a adoção de práticas de conservação de solo buscando-se evitar a ocorrência de processos erosivos que, além da perda de solo, podem impactar os corpos hídricos nas porções inferiores do terreno. A conversão de novas áreas, contudo, é permitida apenas se configurada como de interesse social ou de utilidade pública. De forma similar, as áreas caracterizadas como pantanais e planícies pantaneiras terão sua exploração permitida, adotando-se as recomendações técnicas dos órgãos de pesquisa; novas supressões ficam condicionadas às recomendações técnicas e à autorização do órgão ambiental estadual competente.

## USO ALTERNATIVO DO SOLO (UAS)

Conforme Art. 3, Inciso VI da LPVN, as áreas de uso alternativo do solo (UAS) são todas as áreas da propriedade cuja vegetação nativa e suas formas sucessoras foram substituídas por outras formas de cobertura do solo para dar lugar às atividades agropecuárias, industriais, transmissão de energia, acessos, construções, entre outras.

## LICENCIAMENTO AMBIENTAL

A intervenção, supressão ou exploração em APP, ARL, AUR ou de UAS também estão sujeitas a outros instrumentos legais, além da Lei nº 12.651/2012. Esses instru-

mentos dizem respeito às atividades passíveis de licenciamento ambiental. As principais bases legais no âmbito federal que atualmente regem o licenciamento ambiental no Brasil estão apoiadas nos seguintes instrumentos: Resolução Conama n° 01 (Brasil, 1986<sup>a</sup>); Resolução Conama n° 237 (Brasil, 1997) e Lei Complementar Federal n° 140 (Brasil, 2011). A Resolução Conama n° 1 é um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente (Brasil, 1981) em que traz “as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental”. Segundo essa resolução, “considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; a qualidade dos recursos ambientais”. Traz também uma lista das atividades modificadoras do meio ambiente e sujeitas à elaboração de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e respectivos Relatórios de Impacto Ambiental (Rima). Entre essas atividades, figura em seu inciso XVII (incluído pela Resolução CONAMA n° 11, Brasil, 1986b) os “Projetos Agropecuários que contemplem áreas acima de 1.000 ha ou menores, neste caso, quando se tratar de áreas significativas em termos percentuais ou de importância do ponto de vista ambiental, inclusive nas áreas de proteção ambiental”.

A Resolução CONAMA n° 237, por sua vez, traz novas definições (licenciamento ambiental; licença ambiental, estudos ambientais; e impacto ambiental regional) e, também, procedimentos e critérios que devem ser seguidos pelos órgãos licenciadores no processo de licenciamento ambiental, incluindo as análises para cada tipo de licença previsto, quais sejam: Licença Prévia (LP); Licença de Instalação (LI), e Licença de Operação (LO).

Por fim, a Lei Complementar Federal n° 140 (Brasil, 2011) busca esclarecer e evitar conflitos quanto às competências do Governo Federal, dos estados, Distrito Federal e municípios nos processos de licenciamento ambiental, determinando as ações administrativas competentes a cada um. Estabelece que cabe aos municípios o licenciamento de empreendimentos e atividades de impacto local, ao passo que aos estados cabe o licenciamento daqueles empreendimentos que extrapolam os limites de municípios. As ações administrativas de competência do Governo Federal são previstas pelo Artigo 7° da referida Lei, cujas tipologias de empreendimentos e atividades de competência da União sujeitas ao licenciamento são regulamentadas pelo Decreto n° 8.437 (Brasil, 2015). Os esclarecimentos trazidos pela Lei Complementar visaram tornar os processos de licenciamento mais ágeis. Como decorrência, os estados têm pautado os procedimentos, os critérios e trâmites do licenciamento ambiental de acordo com suas diferentes realidades por meio de leis, decretos, portarias, resoluções, normas, entre outros, tendo como referências a legislação federal sobre

o assunto. O Portal Nacional de Licenciamento Ambiental – PNLA traz a legislação relativa aos processos de licenciamento ambiental aplicáveis em nível federal, estadual e distrital (Brasil, 2021c).

## REGULARIZAÇÃO DE PASSIVOS AMBIENTAIS EM APP E ARL À LUZ DA LPVN

Segundo estimativas da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG, 2022), em balanço do Código Florestal, as estimativas de déficit de áreas com vegetação nativa em APP e ARL no Brasil seriam de 3 e 16 milhões de hectares, respectivamente.

A LPVN estabelece as condições gerais admitidas para sanar eventuais passivos ambientais em APP e ARL, incluindo em algumas situações o estabelecimento de dimensões mínimas a serem recompostas de áreas degradadas ou alteradas e, no caso da RL, a possibilidade da regularização se dar por meio de mecanismos de compensação.

No caso de áreas consolidadas em APP ao longo dos cursos d'água, nascentes e olhos d'água, veredas e lagos e lagoas naturais a continuidade das atividades está condicionada – além da observância de critérios técnicos de conservação do solo e da água – à sua recomposição parcial, cujas dimensões mínimas a serem recompostas são apresentadas nas Tabelas 2.2 e 2.3. Em pequenas propriedades ou posses rurais, a dimensão mínima a ser recomposta ao longo dos cursos d'água independe da largura do curso, importando apenas o número de módulos fiscais do imóvel.

**Tabela 2.2.** Dimensões mínimas a serem recompostas em Áreas de APP ao longo de cursos d'água, nascentes e olhos d'água, veredas e lagos e lagoas naturais.

Nº Módulos Fiscais	Ao longo de cursos d'água	Nascentes e olhos d'água	Veredas	Lagos e lagoas naturais
Até 1 módulo fiscal	5 m	15 m	30 m	5 m
De 1 a 2 módulos fiscais	8 m	15 m	30 m	8 m
De 2 a 4 módulos fiscais	15 m	15 m	30 m	15 m
Acima de 4 módulos fiscais	*	15 m	50 m	30 m

\*Tabela 2.3

**Tabela 2.3.** Dimensões mínimas a serem recompostas em Áreas de APP ao longo de cursos d'água, nascentes e olhos d'água, veredas e lagos e lagoas naturais.

Nº Módulos Fiscais	Largura dos corpos d'água			
	≤ 10 m	10,1 ≤ 60 m	60,1 ≤ 200 m	≥ 200 m
	Faixa marginal a ser recomposta			
4 a 10 MF	20 m	30 m	Largura dos corpos d'água/2	100 m
≥ 10 MF	30 m	30 m	Largura dos corpos d'água/2	100 m

Além das concessões acima quanto à continuidade de atividades agrossilvipastoris em áreas consolidadas em APP até 22 de julho de 2008, bem como com a definição dos valores mínimos de áreas a serem recompostas, o Artigo 61-B da LPVN estabelece para imóveis com até quatro módulos fiscais o percentual máximo a ser ocupado por todas as APP na propriedade, conforme a Tabela 2.4.

**Tabela 2.4.** Percentual máximo da área do imóvel a ser ocupada com APP de acordo com o número de módulos fiscais.

Nº de Módulos Fiscais	% máxima da área do imóvel
Até 2	10
De 2 a 4	20

A recomposição de áreas de APP alteradas ou degradadas pode se dar das seguintes formas (Art. 61-A, parágrafo 13º): condução de regeneração natural de espécies nativas; plantio de espécies nativas; plantio de espécies nativas conjugado com a condução da regeneração natural de espécies nativas. Entretanto, em imóveis com até quatro módulos fiscais também é admitido o plantio intercalado de espécies lenhosas, perenes ou de ciclo longo, exóticas com nativas de ocorrência regional, em até 50% da área total a ser recomposta.

A adequação do imóvel quanto à sua ARL poderá ser feita por meio de ações de recomposição ou por meio de compensação (Art. 66, parágrafo 5º). A recomposição é abordada a partir de duas situações: (i) em imóveis com área menor que quatro módulos fiscais, e (ii) em imóveis com área superior a quatro módulos fiscais. No primeiro caso, não há exigência expressa para a sua recomposição da ARL às dimensões regionais inicialmente previstas, uma vez que o Art. 67 da referida lei afirma que, nesse caso, a área de reserva legal é aquela ocupada com vegetação nativa em 22 de julho de 2008, não importando a dimensão do remanescente existente na referida data. Ainda

poderão ser somadas a essas, as áreas ocupadas por plantios de árvores frutíferas, ornamentais ou industriais, incluindo espécies exóticas, cultivadas em sistema intercalar ou em consórcio com espécies nativas da região em sistemas agroflorestais.

A LPVN permite que no cálculo do percentual da área a ser ocupada por reserva legal sejam computadas as áreas ocupadas por APP (Art. 15). Para isso, contudo, alguns critérios devem ser observados, como (i) a não conversão de novas áreas para uso alternativo do solo, e (ii) que a área de APP a ser considerada para o cômputo esteja conservada ou em processo de recuperação. Na Amazônia Legal, em áreas de florestas, a conversão de novas áreas é admitida caso o somatório das áreas de APP e de outras formas de vegetação nativa excedam a 80% da área do imóvel. Em todos os casos, contudo, são mantidos os papéis e regime de proteção atribuídos às APP.

A compensação, por sua vez, pode se dar das seguintes formas: (i) aquisição de Cota de Reserva Ambiental (CRA) – título representativo de área com vegetação nativa, existente ou em processo de recuperação, cujo valor unitário é de um hectare; (ii) arrendamento de área sob regime de servidão ambiental ou Reserva Legal; (iii) doação de área localizada no interior de Unidade de Conservação de domínio público pendente de regularização fundiária; (iv) cadastramento de área equivalente e excedente à Reserva Legal, em imóvel de mesma titularidade ou adquirida em imóvel de terceiro, com vegetação nativa estabelecida, em regeneração ou recomposição, desde que localizada no mesmo bioma.

A recomposição de áreas de ARL alteradas ou degradadas pode se dar das seguintes formas (Art. 66, parágrafo 3º): condução de regeneração natural de espécies nativas; plantio de espécies nativas; plantio de espécies nativas conjugado com a condução da regeneração natural de espécies nativas; e o plantio intercalado de espécies nativas com exóticas, incluindo frutíferas, em sistema agroflorestal. No último caso, o plantio de espécies exóticas não poderá ser superior a 50% da área total em recomposição.

## ESTRATÉGIAS DE RECOMPOSIÇÃO

Uma vez analisado e aprovado o CAR do imóvel, após identificação dos eventuais passivos ambientais, o passo seguinte é a adesão ao Programa de Regularização Ambiental (PRA) do estado. Nele, o proprietário ou posseiro poderá optar pela recomposição das áreas degradadas e/ou alteradas ou, no caso da ARL, por sua compensação. A adesão ao PRA é formalizada pela assinatura do Termo de Compromisso de Regularização Ambiental (TCRA). O TCRA juntamente com o Projeto de Recomposição de Áreas Degradadas ou Alteradas (Prada) são descritas pelo Decreto nº 8.235/2014 (Brasil, 2014) como instrumentos do PRA, de modo que deverão ser apontados os dados do imóvel, a localização das áreas de APP, ARL, AUR a serem recompostas ou compensadas no caso de ARL, com a proposta para a recomposição e os indicadores

de progresso que serão utilizados junto ao cronograma das ações a serem executadas, entre outras.

Especificamente com relação à opção pela recomposição, Skorupa et al. (2021) apresentam um roteiro visando orientar a elaboração do Prada. O roteiro, além de sugerir uma estrutura de projeto, oferece informações técnicas conforme seu preenchimento, auxiliando o técnico ou mesmo o produtor na tomada de decisão quanto às melhores estratégias a serem utilizadas na recomposição de áreas degradadas ou alteradas, como também das espécies mais adequadas à sua região e à condição avaliada por meio de sugestões oferecidas pelo sistema WebAmbiente (2022). De um modo geral, a definição das melhores estratégias leva em consideração os níveis de degradação observados nas áreas a serem recompostas, os quais são definidos durante a fase de diagnóstico. A Figura 2.6 apresenta uma síntese das diferentes condições locais utilizadas para considerar as possíveis estratégias de recomposição, tendo como referência as condições iniciais quanto ao potencial de regeneração natural da área, a existência de perturbação, alteração ou degradação, além de diferentes ações necessárias para conter eventuais vetores de degradação. O potencial de regeneração natural da área reflete a sua resiliência, ou seja, a capacidade da vegetação nativa se impor e se restabelecer naturalmente por meio do processo de recobrimento do solo e da presença da diversidade de espécies após o seu isolamento pela contenção de vetores de degradação e de atividades agropecuárias.

CONDIÇÃO DA ÁREA A SER RECOMPOSTA	Perturbada ou alterada		Degradada
POTENCIAL DE REGENERAÇÃO NATURAL	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTERNATIVAS DE RECOMPOSIÇÃO CONFORME A LEI Nº 12.651/2012	Condução da regeneração natural	Plantio de espécies nativas, conjugado com a condução da regeneração de espécies nativas	Plantio de espécies nativas
	Uso intercalado de espécies lenhosas, perenes ou de ciclo longo, exóticas com nativas de ocorrência regional, em até 50% da área total a ser recomposta		
ESTRATÉGIAS PARA RECOMPOSIÇÃO	Recomposição Passiva: controle dos fatores de degradação	Manejo da regeneração e/ou realização de plantios parciais para: adensamento, enriquecimento, nucleação	Plantio em Área Total: semeadura direta e/ou plantio de mudas ou estacas
CONTROLE DOS FATORES DE DEGRADAÇÃO	Cercamento da área, controle de plantas competidoras, controle de formigas cortadeiras, contenção de fogo, eliminação de processos erosivos e recuperação da fertilidade do solo		

**Figura 2.6.** Síntese da abordagem para a escolha das melhores estratégias de recomposição, levando em conta as alternativas legais e as condições iniciais das áreas a serem recompostas.

Fonte: Adaptado de Skorupa et al. (2021)

## CLASSES DE RESILIÊNCIA CONSIDERADAS PARA AS RECOMENDAÇÕES DE RECOMPOSIÇÃO:

**ALTO POTENCIAL DE REGENERAÇÃO:** áreas que apresentam elevado número de regenerantes e diversidade de espécies, bem como boas condições físicas e químicas do solo que possibilitem o pleno desenvolvimento da vegetação nativa. Geralmente, trata-se de áreas com proximidades a fragmentos de vegetação nativa, fonte de propágulos. A estratégia indicada para essa situação é a de recomposição passiva, em que a intervenção ocorre apenas na eliminação ou mitigação dos fatores de degradação.

**MÉDIO POTENCIAL DE REGENERAÇÃO:** áreas que apresentam regenerantes e alguma diversidade de espécies, muitas vezes concentradas em porções específicas da área, algumas vezes em número reduzido. Em geral, ainda apresentam boas con-

dições físicas e químicas do solo que permitem o bom desenvolvimento dos regenerantes presentes. Podem ou não estar próximas a fragmentos de vegetação nativa e as limitações podem estar sendo impostas por fatores de degradação, a processos de compactação do solo, entre outros. Nesse caso, a estratégia recomendada é a de manejo da regeneração natural que, além da condução dos regenerantes existentes, devem ser consideradas a adoção de outras abordagens, como o de plantios que visem o adensamento, enriquecimento e/ou de técnicas de nucleação (Reis et. al., 2003). No adensamento, busca-se o preenchimento dos espaços abertos, com espécies facilitadoras, visando maior cobertura do solo; no enriquecimento, busca-se incrementar a diversidade de espécies já identificadas, buscando garantir longevidade e manutenção da vegetação no longo prazo. Rodrigues et al. (2009) destacam essa situação, principalmente na restauração de florestas. Em todos os casos, a contenção dos fatores de degradação deve ser considerada.

**BAIXO POTENCIAL DE REGENERAÇÃO:** áreas que não apresentam regenerantes de espécies nativas ou, se presentes, ocorrem de forma muito reduzida são comumente áreas submetidas às prolongadas atividades agropecuárias, ou abandonadas com a ocorrência de solos notadamente compactados, ou que sofreram danos de grande intensidade, como os ocasionados por incêndios florestais ou grande revolvimento de solo, não permitindo o estabelecimento da vegetação nativa. São áreas que requerem maior intervenção na restauração, incluindo operações para restaurar as condições físico-químicas do solo, além daquelas destinadas a conter os fatores de degradação. A estratégia recomendada nesse caso é o de plantio em área total por meio do plantio de mudas, de semeadura direta ou pelo uso de estacas.

O planejamento da recomposição, incluindo a escolha da(s) estratégia(s), pode ser direcionado apenas para a recomposição de uma área alterada ou degradada com vistas a restabelecer ou incrementar a oferta de serviços ecossistêmicos; ou, adicionalmente, pode ser direcionado para a obtenção de sistemas agroflorestais (SAF) – associação de espécies lenhosas com culturas agrícolas, às vezes também com animais, de forma simultânea ou obedecendo uma sequência temporal de espécies (Figura 2.7), visando retornos econômicos oriundos da produção agrícola, florestal ou animal (Miccolis et al., 2016). O uso de SAF é previsto na recomposição de APP e ARL em imóveis rurais com até quatro módulos fiscais; na recomposição de ARL em imóveis maiores que quatro módulos fiscais sua configuração deve contemplar o plantio de espécies nativas intercalado com espécies exóticas, incluindo frutíferas, em sistema agroflorestal, não podendo o plantio de espécies exóticas ser superior a 50% da área total em recomposição (Art. 66, parágrafo 3º).

Fotos Mauricilia Silva (A); Ronaldo Rosa (B)



**Figura 7.** Exemplos de Sistemas Agroflorestais: (A) Sistema Agroflorestal com açai, banana, seringueira e castanheira, enriquecido com crotalária; (B) Sistema Agroflorestal com andiroba, limão e cacau.

## FERRAMENTAS PARA APOIAR O PLANEJAMENTO E O MONITORAMENTO DA RECOMPOSIÇÃO

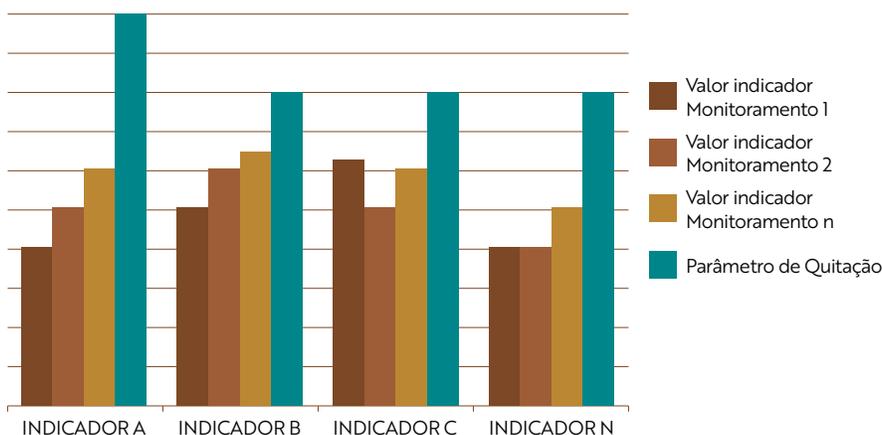
Em 2018, a Embrapa em parceria com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), Ministério do Meio Ambiente e com diversos outros parceiros externos desenvolveu e disponibilizou o sistema WebAmbiente para auxiliar o produtor rural na adequação ambiental de sua posse ou propriedade rural (WebAmbiente, 2022). O sistema conta com um simulador que, a partir da inserção de informações sobre a localização geográfica e das condições gerais da área a ser recomposta, oferece sugestões de estratégias de recomposição e de boas práticas a serem adotadas, além de uma relação de espécies nativas a serem consideradas no planejamento da recomposição da área em questão para os diferentes biomas nacionais. Ao final da simulação, o sistema produz um relatório no formato pdf, agregando todas as informações inseridas pelo usuário, bem como as sugestões oferecidas pelo sistema, sendo, portanto, importante subsídio para a elaboração de um projeto de recomposição de áreas degradadas ou alteradas (Prada). Além do simulador, o sistema disponibiliza um conjunto de publicações técnicas sobre experiências em recomposição de áreas degradadas, as quais podem ser selecionadas por bioma, categoria de área a ser recuperada, estratégias e técnicas utilizadas; manuais e guias sobre recomposição, além de outras publicações técnico-científicas que podem auxiliar as tomadas de decisão quanto a melhor estratégia ou técnica, escolha de espécies, dentre outras.

Atualmente, o simulador do sistema está associado ao Módulo de Regularização Ambiental (MRA) do Sistema de Cadastro Ambiental Rural (Sicar) (Serviço Florestal Brasileiro, 2022).

## MONITORAMENTO DA RECOMPOSIÇÃO

Os indicadores, bem como os parâmetros aferidores do progresso da recomposição das áreas com passivos ambientais, devem ser aqueles previstos nos Programas de Regularização Ambiental (PRA) de cada estado, a exemplo do estado de São Paulo (Marçon, 2021; São Paulo, 2021), Distrito Federal (Sousa; Vieira, 2017) e do estado de Mato Grosso (Sousa; Vieira, 2018), e serem contemplados na elaboração do Prada de cada imóvel. Há diversos indicadores utilizados para avaliar a recomposição. Os dados requeridos para a sua obtenção envolvem desde levantamentos exaustivos de campo até levantamentos expeditos, os quais, no conjunto, devem refletir o progresso da recomposição. Entre os indicadores mais comumente utilizados estão (i) a cobertura do solo por vegetação nativa (%); (ii) cobertura do solo com vegetação exótica (%); (iii) solo exposto (%); (iv) clareiras (%); (v) número de regenerantes de espécies nativas por hectare; (vi) número de espécies nativas; (vii) área basal (m<sup>2</sup>/ha).

A obtenção sistemática de indicadores de recomposição (monitoramento) e sua avaliação vis a vis aos parâmetros de quitação estabelecidos previamente para cada um deles em cada estado deverá fornecer subsídios para a avaliação contínua do progresso da recomposição, incluindo a adequação das estratégias e espécies utilizadas, ou da necessidade de ajustes ao longo do tempo, ou manejos adaptativos (Durigan; Ramos, 2013; Ferreira Júnior et al., 2020). Os parâmetros de quitação estabelecidos para cada indicador são aqueles entendidos como os valores mínimos que devem ser atingidos ao longo do tempo do projeto visando assegurar a continuidade das trajetórias ecológicas da recomposição em longo prazo (Figura 2.8).



**Figura 2.8.** Exemplo de modelo para o acompanhamento do processo de recomposição por meio de indicadores ao longo do tempo, tendo como referência seus respectivos parâmetros de quitação.

Ao lado do sistema WebAmbiente, no apoio à implementação no novo Código Florestal, a Embrapa desenvolveu e tem aprimorado um sistema dedicado ao monitoramento de ações de recomposição em APP, ARL e AUR, denominado Agrotag VEG (Agrotag, 2022). Trata-se de um sistema composto por um aplicativo para uso em dispositivos móveis, associado a uma interface WebGis, de modo que as informações coletadas em campo são armazenadas em banco de dados geoespacial, podendo ser acessadas e gerenciadas. Entre as funcionalidades do sistema está a possibilidade de delimitação da área do imóvel e das glebas/polígonos em processos de recomposição; caracterização geral da área e dados sobre a implementação do projeto e das técnicas utilizadas (Figura 2.9).

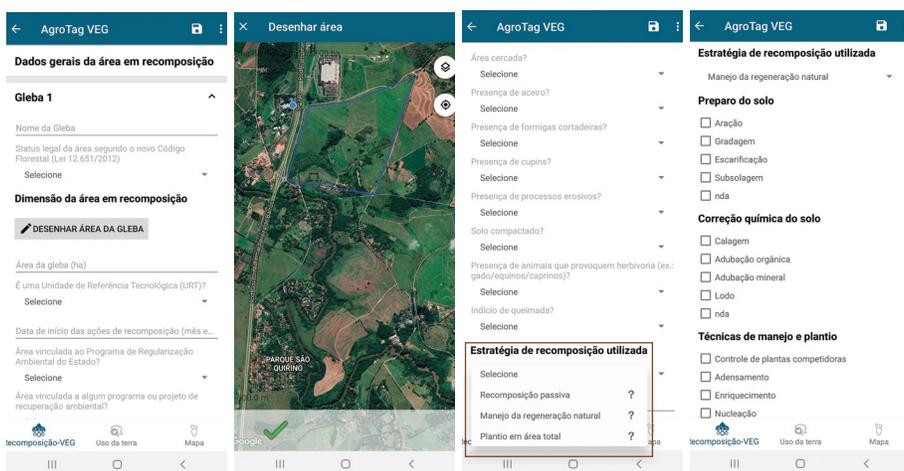


Figura 2.9. Telas do Sistema Agrotag VEG: delimitação das áreas de interesse, caracterização e informações sobre a implementação de um projeto.

Além disso, o sistema permite que sejam feitos registros fotográficos georreferenciados das áreas em recomposição, bem como o acompanhamento da recomposição por meio de indicadores (Figura 2.10). A possibilidade da atualização e acompanhamento dos valores dos indicadores ao longo do tempo torna o sistema relevante para uso nas etapas de monitoramento do progresso da recomposição nos diversos biomas. Esse sistema apresenta excelentes características para auxiliar os órgãos estaduais no monitoramento do sucesso da recomposição prevista no PRA.

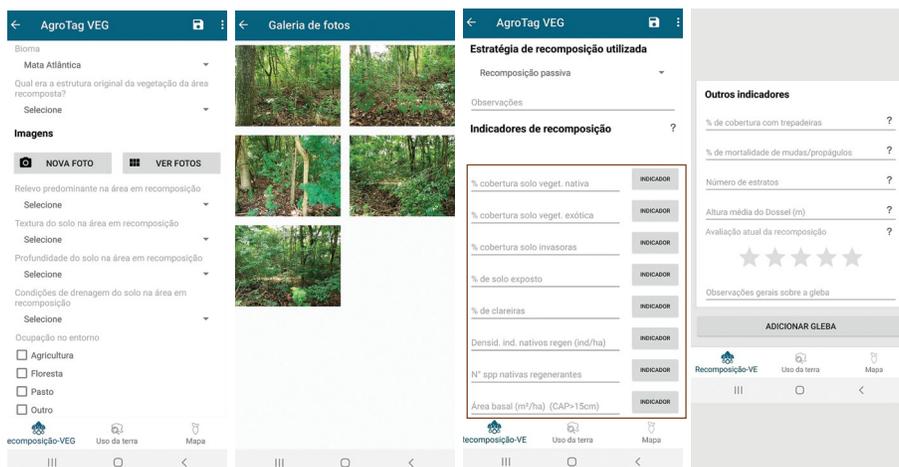


Figura 2.10. Telas do Sistema Agrotag VEG: registro fotográfico georreferenciado e indicadores contemplados.

## SISTEMAS, PROCESSOS E PRÁTICAS AGROPECUÁRIAS SUSTENTÁVEIS

Os benefícios da presença e distribuição adequada da vegetação nativa nas propriedades e posses rurais se relacionam estreitamente aos benefícios gerados pelas atividades agropecuárias sustentáveis, no que diz respeito à oferta de serviços ecossistêmicos de provisionamento, suporte e regulação. A percepção de que as atividades agropecuárias também desempenham outros papéis, além do da produção de alimentos, fibras e energia tem se consolidado, refletindo-se em políticas públicas, a exemplo da Política Nacional da Mudança do Clima (Brasil, 2009) e dos Planos ABC e ABC+ (Brasil, 2012b; Brasil, 2021b). Ou seja, essas políticas reconhecem a importância das inter-relações entre a conservação ambiental, a multifuncionalidade da produção agropecuária e as externalidades daí advindas como de interesse público.

Assim, a importância da ocupação ordenada do espaço rural se soma ao da atenção que deve ser reservada à adoção de boas práticas agropecuárias (BPA), evitando, eliminando ou mitigando riscos ambientais e, ao mesmo tempo, potencializando a produção agropecuária, a conservação dos recursos naturais e a oferta de serviços ecossistêmicos associados.

Diversos sistemas de produção e boas práticas agropecuárias têm sido desenvolvidas e aprimoradas ao longo das últimas décadas, conforme as listadas na Tabela 2.5. Um dos mais abrangentes, no que diz respeito à incorporação de boas práticas agropecuárias, é o Sistema Plantio Direto (SPD), o qual incorpora um conjunto de boas

práticas agrícolas que visam à proteção, conservação e a capacidade produtiva do solo (Salton et al., 1998). O SPD preconiza o plantio ou semeadura direta sobre palhada ou restos de material orgânico visando a proteção permanente do solo, associado a adoção de outras práticas como a sucessão e rotação de culturas; plantio em curvas de nível e construção de terraços; além de outras visando o aumento e manutenção da biota do solo, fertilidade, uso e aplicação de defensivos para o controle de pragas e doenças; gestão de resíduos, entre outros. Sua adoção tem repercussões diretas sobre outros compartimentos da propriedade e da bacia hidrográfica, como, por exemplo, sobre os recursos hídricos.

**Tabela 2.5.** Sistemas, processos e boas práticas agropecuárias aplicáveis à adequação agroambiental de uma propriedade rural.

Sistemas e Boas Práticas Agropecuárias	Referências
Sistema Plantio Direto (SPD)	Salton et al. (1998)
Recuperação de pastagens degradadas (RPD)	Borghi et al. (2018)
Sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF)	Balbino et al. (2011); Cordeiro et al. (2015)
Gestão de Resíduos na Agricultura	Spadotto; Ribeiro (2006)
Tecnologia de aplicação de defensivos	Azevedo; Freire (2006)
Construção e manutenção de estradas rurais	Demarchi et al. (2003)
Controle de processos erosivos	Resck (2002); Wadt (2004); Araújo et al. (2005); Filizola et al. (2011); Bertoni; Lombardi (2008)
Captação de águas superficiais de chuvas - Barraginhas	Barros (2000)

## SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA (ILPF)

Entre os sistemas que tem merecido destaque é o sistema de integração lavoura (L), pecuária (P) e floresta (F), ou sistema ILPF. Trata-se de uma estratégia de produção que integra as atividades agrícolas, pecuárias e florestais em uma mesma área por meio de consórcios, rotação e sucessão, buscando-se efeitos benéficos da interação dos componentes, preconizando o SPD e conciliando a adequação ambiental, a valorização do homem e a viabilidade econômica (Balbino et al., 2011). Por ser uma estratégia de produção e não de um modelo específico, ele permite uma grande variedade de arranjos de seus componentes no tempo e no espaço do ambiente de produção, bem como a possibilidade de incorporar tecnologias e boas práticas agropecuárias, a exemplo do Sistema de Plantio Direto (SPD) (Salton et al., 1998). Por sistemas ILPF são consideradas as seguintes modalidades:

- Integração Lavoura-Pecuária (ILP ou Agropastoril): sistema que integra os componentes lavoura e pecuária em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área, em um mesmo ano agrícola ou em múltiplos anos;
- Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF ou Agrossilvipastoril): sistema que integra os sistemas lavoura, pecuária e silvicultura em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área. Nessa modalidade, o componente lavoura restringe-se (ou não) à fase inicial de implantação do componente florestal;
- Integração Pecuária-Floresta (IPF ou Silvipastoril): sistema que integra os componentes pecuária e floresta em consórcio;
- Integração Lavoura-Floresta (ILF ou Silviagrícola): sistema que integra os sistemas lavoura e floresta pela consorciação de espécies arbóreas com cultivos agrícolas (anuais ou perenes).

Trata-se de uma estratégia de produção que pode se adaptar a qualquer tamanho de propriedade, nível socioeconômico e condições edafoclimáticas, e que propicia a obtenção de benefícios agronômicos, socioeconômicos e ambientais (Vilela et al. 2019). A exemplo disso, do ponto de vista agronômico, propicia a redução da incidência de pragas e doenças, a melhoria e manutenção das condições físico-químicas e biológicas do solo, com aumento do teor de matéria orgânica, aumento da eficiência no uso de insumos e conforto térmico animal pelo sombreamento proporcionado pelo componente arbóreo em sistemas silvipastoris (IPF) e agrossilvipastoris (ILPF), redução dos efeitos de déficits hídricos e inversões térmicas bruscas; do ponto de vista socioeconômico, possibilita a intensificação do uso do solo durante todo ano com a diversificação dos sistemas de produção, reduzindo riscos; aumento e retenção de mão de obra na propriedade; do ponto de vista ambiental, destaca-se pelo potencial de reduzir as pressões para a abertura de novas áreas, uma vez que possibilita a di-

versificação e intensificação da produção em uma mesma área, além de possibilitar a recuperação e incorporação de pastagens degradadas ao processo produtivo. Permeando estes aspectos, contribui para a mitigação de carbono pelo seu sequestro, seja na matéria orgânica do solo ou na biomassa do componente arbóreo, bem como de gases de efeito estufa emitidos no processo produtivo, como o dióxido de carbono, o metano e o óxido nitroso.

A recuperação de pastagens degradadas pela adoção da estratégia de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) tem sido promovida por diversas políticas públicas. Segundo dados do estado das pastagens brasileiras do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (Lapig, 2023), o Brasil possuía em 2021 cerca de 160 milhões de hectares cobertos por pastagens. Desse total, cerca de 66 milhões de hectares apresentavam níveis intermediários de degradação, e 35 milhões em estágios avançados (22% da área com pastagem no País). Segundo pesquisa recente sobre a adoção de sistemas ILPF no Brasil (ILPF em números, 2016; Skorupa; Manzatto, 2019b), a recuperação de pastagens pelo emprego de sistemas ILPF é um dos principais motivadores para sua adoção entre os pecuaristas típicos, uma vez que a combinação dos componentes lavoura e pecuária (pastagem) em rotação, consórcio ou sucessão numa mesma área, possibilita que os níveis adequados de produtividade das pastagens possam ser alcançados e mantidos ao longo do tempo. A prática de recuperação de pastagens utilizando culturas agrícolas é utilizada frequentemente com o propósito de amortizar os custos da recuperação pela renda obtida com a safra de grãos, cobrindo despesas com a correção do solo e o plantio da forrageira (Vilela et al, 2019). Nesse processo, no ciclo de pecuária, a pastagem se beneficia da adubação residual deixada pela produção de grãos. As Figuras 2.11 e 2.12 apresentam exemplos de estratégia ILPF na configuração ILP. O número de áreas da propriedade envolvidas no sistema de integração, bem como a dinâmica da ocupação dessas áreas com os componentes lavoura e pecuária no tempo e espaço são definidas a priori e fazem parte do planejamento, a fim de garantir os benefícios da estratégia.

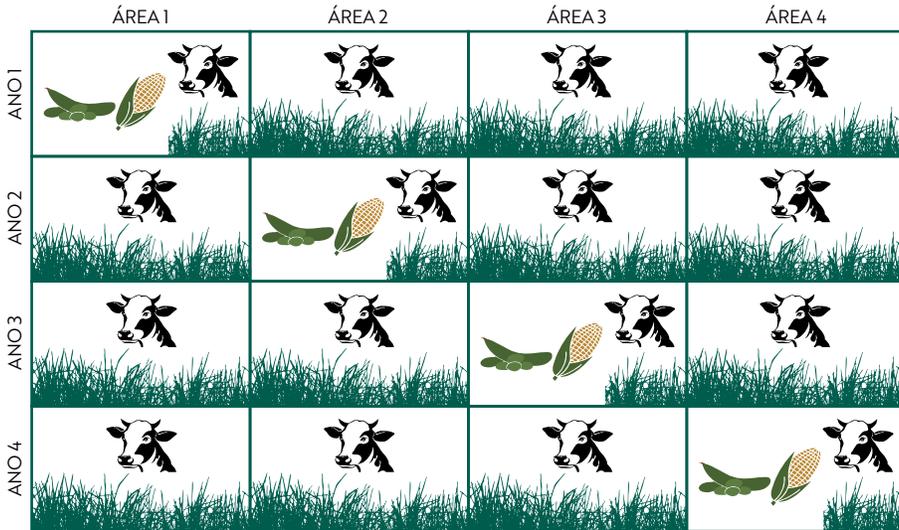


Figura 2.11. Exemplo de planejamento para implantação de um sistema ILP com soja, milho segunda safra e pastagem (de outono/inverno e permanente).



Figura 2.12. Exemplos de fases de sistema Integração lavoura-pecuária (ILP): (A) cultivo de soja em plantio direto; (B) cultivo de milho, segunda safra, em sucessão, com sobresemeadura de capim (consórcio); (C) pastagem resultante.

A Figura 2.13 apresenta um exemplo da estratégia ILPF com a inclusão do componente arbóreo, o qual pode ser incorporado em uma ou mais áreas da propriedade contempladas com a estratégia de integração.

Fotos: Gabriel Faria (A); Ladislau Skorupa (B); Danilo Moreira (C)

Fotos: Gabriel Resende Faria



**Figura 2.13.** Exemplos de fases do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF): (A) cultivo de soja em área com eucalipto (ILF, fase silviagrícola); (B) cultivo de milho, segunda safra, em sucessão (ILF, fase silviagrícola); (C) pastagem estabelecida após sobressemeadura de capim no cultivo de milho (IPF, fase silvipastoril).

A adoção de sistemas ILPF no Brasil foi estimada na safra 2015/2016 em 11,5 milhões de hectares (ILPF em números, 2016). Atualmente, estima-se que os sistemas ILPF, em suas diversas modalidades, ocupem no Brasil uma área de cerca de 17 milhões de hectares (Polidoro et al., 2020). Além dos serviços ecossistêmicos de provisionamento, os sistemas ILPF também ofertam serviços de suporte e regulação, sendo contemplado no desenvolvimento de marcas conceito, como o de Carne-Carbono-Neutro (Alves et al., 2015). O reconhecimento de seus benefícios foi refletido na sua inclusão no Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono – Plano ABC 2010–2020 e, atualmente, no Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária – Plano ABC+ 2020–2030, que prevê sua expansão em 10 milhões de hectares (Brasil, 2021b). Uma visão ampla da adoção de sistemas ILPF nos estados brasileiros, suas diversas configurações, culturas contempladas, incluindo avaliações de impactos socioambientais são apresentados em Skorupa e Manzatto (2019a).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diversos são os desafios atuais para a agropecuária brasileira decorrentes da combinação dos efeitos da globalização das questões ambientais, da diversidade de biomas, das condições socioeconômicas dos agricultores, da necessidade de ganhos de produtividade como estratégia para o aumento da produção e redução dos custos, e das exigências dos mercados quanto a sustentabilidade ambiental dos sistemas de produção. Nesse contexto, a multifuncionalidade das áreas destinadas à produção agropecuária e das demais coberturas vegetais na propriedade ganham importância. Mais do que isso, as áreas de produção agropecuária não podem ser tratadas de forma isolada das demais áreas da propriedade ou posse rural, a exemplo das áreas de reserva legal, de preservação permanente e de uso restrito, tendo em vista os diversos serviços ecossistêmicos por elas ofertados. Contrariando a ideia de que a conservação de tais áreas implica em ônus e perdas para a produção, elas podem adicionar diver-

sof benefícios, essenciais para conservação do capital natural, para a sustentabilidade da produção e o aumento da produtividade. Por outro lado, tão importante quanto atender à legislação ambiental tem sido a busca por sistemas, processos e práticas agropecuárias (SPPA) mais eficientes na conservação do solo e água, uso de insumos, bem como na mitigação de emissões de GEE nos processos produtivos.

A interdependência das questões ambientais e produtivas tem sido reconhecida em diversas políticas públicas nacionais, como, por exemplo, no Plano ABC+, no Plano Safra (2023–2024) e seu programa Renovagro, e o Pronaf ABC+ Floresta que, além da promoção de SPPA, também têm apoiado a adequação ambiental das propriedades e posses rurais. Tal integração de políticas aponta para a importância do que pode ser denominado de Gestão Ambiental Produtiva (GAP). Embora não seja uma abordagem nova, esta precisa ser intensificada e integrada nas agendas governamentais e de PD&I das instituições acadêmicas e agropecuárias, criando condições para que produtores rurais de diferentes perfis socioeconômicos possam ter, além de ganhos na produção, ganhos econômicos adicionais por meio da melhoria da imagem de sua produção e tendo acesso a mercados diferenciados. Tais ganhos, ainda, podem ser oriundos do recebimento de pagamento por prestação de serviços ambientais, da venda de cotas de reserva ambiental (CRA), por meio de processos de certificação da produção e de produtos, entre outros. Certamente, esta é uma agenda que deve prosperar nos próximos anos.

## REFERÊNCIAS

AGROTAG. Disponível em: <https://www.agrotag.cnptia.embrapa.br/#1>. Acesso em: 10 mar. 2021.

ALVES, F. V.; ALMEIDA, R. G.; LAURA, V.A.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MACEDO, M. C. M.; MEDEIROS, S. R.; FERREIRA, A. D.; GOMES, R. C.; ARAÚJO, A. R.; MONTAGNER, D. B.; BUNGENSTAB, D. J.; FEIJÓ, G. D. **Carne carbono neutro: um novo conceito para carne sustentável produzida nos trópicos**. Brasília, DF: Embrapa Gado de Corte, 2015. 32 p. (Embrapa Gado de Corte. Documentos, 210).

ARAUJO, G. H. S.; ALMEIDA, J. R. de; GUERRA, A. J. T. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. 320 p.

ASSAD, E. D.; ESTEVAM, C. G.; DE LIMA, C. Z.; PAVÃO, E. M.; PINTO, T. P. **Potencial de mitigação de gases de efeito estufa das ações de descarbonização da pecuária até 2030: observatório de conhecimento e inovação em bioeconomia**. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas - FGV-EESP, 2021. Disponível em: [https://eesp.fgv.br/sites/eesp.fgv.br/files/ocbio\\_potencial\\_de\\_mitigacao\\_de\\_gee\\_pecuaria\\_2112.pdf](https://eesp.fgv.br/sites/eesp.fgv.br/files/ocbio_potencial_de_mitigacao_de_gee_pecuaria_2112.pdf). Acesso em: 04 set. 2022.

AZEVEDO, F. R.; FREIRE, F. C. O. **Tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2006. 47 p. (Embrapa Agroindústria Tropical. Documentos, 102).

BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. de O.; STONE, L. F. **Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília: Embrapa, 2011. 130 p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/923530/1/balbino01.pdf>. Acesso em: 02 set. 2022.

BARROS, L. C. de. **Captação de águas superficiais de chuvas em Barraginhas**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2000. 16 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 2). Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/96925/1/circ-2.pdf>. Acesso em: 02 set. 2020.

BERTONI, J.; LOMBARDI, F. L. **Conservação do solo**. 6. ed. São Paulo: Ícone, 2008. 355 p.

BORGHI, E.; GONTIJO NETO, M. M.; RESENDE, R. M. S.; ZIMMER, A. H.; ALMEIDA, R. G. de; MACEDO, M. C. M. **Recuperação de pastagens degradadas**. In: NOBRE, M. M.; OLIVEIRA, I. R. de (ed.). **Agricultura de baixo carbono: tecnologias e estratégias de implantação**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. cap. 4, p. 105-138.

BRASIL. Decreto nº 6.514 de 22 de julho de 2008. Dispõe sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente, estabelece o processo administrativo federal para apuração destas infrações, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 23 jul. 2008. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2008/decreto/d6514.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/decreto/d6514.htm). Acesso em: 10 mar. 2022.

BRASIL. Decreto nº 7.830, de 17 de outubro de 2012. Dispõe sobre o sistema de cadastro ambiental rural, o cadastro ambiental rural, estabelece normas de caráter geral aos programas de regularização ambiental, de que trata a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 18 out. 2012a. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2012/Decreto/D7830.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Decreto/D7830.htm). Acesso em: 31 mar. 2021.

BRASIL. Decreto nº 8.235, de 05 de maio de 2014. Estabelece normas gerais complementares aos programas de regularização ambiental dos estados e do distrito federal, de que trata o decreto nº 7.830, de 17 de outubro de 2012, institui o programa mais ambiente brasil, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 05 maio 2014, ed. Extra e retificado 05 maio 2014. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2014/Decreto/D8235.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2014/Decreto/D8235.htm). Acesso em: 31 mar. 2021c.

BRASIL. Decreto 8.437, de 22 de abril de 2015. Regulamenta o disposto no art. 7º, caput, inciso XIV, alínea “h”, e parágrafo único, da Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011, para estabelecer as tipologias de empreendimentos e atividades cujo licenciamento ambiental será de competência da União. **Diário Oficial da União**, 23 abr. 2015, p. 4, col. 3. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2015/decreto/d8437.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/decreto/d8437.htm). Acesso em: 13 abr. 2023.

BRASIL. Lei complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011. Fixa normas, nos termos dos incisos III, VI e VII do caput e do parágrafo único do art. 23 da Constituição Federal, para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas decorrentes do exercício da competência comum relativas à proteção das paisagens naturais notáveis, à proteção do meio ambiente, ao combate à poluição em qualquer de suas formas e à preservação das florestas, da fauna e da flora; e altera a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. **Diário Oficial da União**, 09 dez. 2011. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/lcp/lcp140.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp140.htm). Acesso em: 19 ago. 2021.

BRASIL. Lei nº 6.746 de 10 de dezembro de 1979. Altera o disposto nos arts. 49 e 50 da Lei nº 4.504, de 30 de novembro de 1964 (Estatuto da Terra), e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 11 dez 1979. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/1970-1979/l6746.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1970-1979/l6746.htm). Acesso em: 10 mar. 2022.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 02 set. 1981. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L6938compilada.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938compilada.htm). Acesso em: 20 ago. 2021.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 13 fev. 1998, retificada 17 fev. 1998. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19605.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm). Acesso em: 20 ago. 2021.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 10, incisos I, II, III e VII da Constituição federal, institui o sistema nacional de unidades de conservação da natureza e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 19 jul. 2000. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19985.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm). Acesso em: 10 mar. 2022.

BRASIL. Lei nº 11.326, de 24 de julho de 2006. Estabelece as diretrizes para a formulação da política nacional da agricultura familiar e empreendimentos familiares rurais. 2006. **Diário Oficial da União**, 25 jul. 2006b. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=4080268&disposition=inline>. Acesso em: 10 mar. 2022.

BRASIL. Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 26 dez. 2006a, p. 1. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2006/lei/11428.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/11428.htm). Acesso em: 10 mar. 2022.

BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a política nacional sobre mudança do clima – PNMC e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 29 dez. 2009. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm). Acesso em: 20 ago. 2021.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 28 maio 2012b. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm). Acesso em: 11 abr. 2023.

BRASIL. Lei nº 12.727, de 17 de outubro de 2012. Altera a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001, o item 22 do inciso II do art. 167 da Lei nº 6.015, de 31 de dezembro de 1973, e o § 2º do art. 4º da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Diário Oficial da União**, 18 out. 2012c. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12727.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12727.htm). Acesso em: 19 ago. 2021.

BRASIL. Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021. Institui a política nacional de pagamento por serviços ambientais; e altera as Leis nºs 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política. **Diário Oficial da União**, p. 7, col. 2, 14 jan. 2021a. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.119-de-13-de-janeiro-de-2021-298899394>. Acesso em: 02 abr. 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono)**. Brasília, DF: MAPA/ACS, 2012d. 173 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030): plano operacional**. Brasília, DF: MAPA, 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/final-isbn-plano-setorial-para-adaptacao-a-mudanca-do-clima-e-baixa-emissao-de-carbono-na-agropecuaria-compactado.pdf>. Acesso em: 08 set. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Portal nacional de licenciamento ambiental. **Legislação**. Brasília, DF: MMA/PNLA, [s.d.]. Disponível em: <http://pnla.mma.gov.br/legislacao>. Acesso em: 18 ago. 2021c.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 01, de 23 de janeiro de 1986. Estabelece as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da avaliação de impacto ambiental como um dos instrumentos da política nacional do meio ambiente. **Diário Oficial da União**, 17 fev. 1986a. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0001-230186.PDF>. Acesso em: 19 ago. 2021.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 11, de 18 de março de 1986. **Diário Oficial da União**, 02 maio 1986b. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0011-180386.PDF>. Acesso em: 18 ago. 2021.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997. **Diário Oficial da União**, 22 dez. 1997. Disponível em: [https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/CONAMA%20237\\_191297.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/CONAMA%20237_191297.pdf). Acesso em: 19 ago. 2021.

CHIODI, R. E.; MARQUES, P. E. M. Multifuncionalidade da Agricultura e Serviços ambientais: aproximações e distanciamentos como referenciais de políticas públicas. **Desenvolvimento em questão**, v. 16, n. 45, p. 214-232, 2018. Disponível em: <https://www.revistas.unijui.edu.br/index.php/desenvolvimentoemquestao/article/view/6893>. Acesso em: 13 abr. 2023.

CONAB. **Estimativa indica aumento na produção de grãos na safra 2021/22, com previsão em 288,61 milhões de toneladas**. 07 out. 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4316-estimativa-indica-aumento-na-producao-de-graos-na-safra-2021-22-com-previsao-em-288-61-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 10 nov. 2021.

CORDEIRO, L. A.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (ed). **Integração lavoura-pecuária-floresta: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. 393 p. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas).

COSTANZA, R., D'ARGE, R., DE GROOT, R. S., FARBER, S., GRASSO, M., HANNON, B., LIMBURG, K., NAEEM, S., O'NEILL, R. V., PARUELO, J., RASKIN, R. G., SUTTON, P.; VAN DEN BELT, M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, v. 387, p. 253-260, 1997.

DE CARLI, B. P.; SOUZA, J. C.; SOUSA, J. A. P.; SHOEGIMA, T. F.; ROMERO BARREIRO, M. P.; DUTRA, A. C.; MEDEIROS, G. A.; RIBEIRO, A. I.; BRESSANE, A. Relationship between land use and water quality in a subtropical river basin. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 7, n. 3, p. 245-261, 2018.

DEMARCHI, L. C.; RABELLO, L. R.; SANTOS, N. B. dos; FRANCO, O.; CORREA, R. O. **Adequação de estradas rurais: Programa estadual de microbacias hidrográficas**. Campinas: CATI, 2003. 64 p. (Manual CATI, 77). Disponível em: [http://www.cati.sp.gov.br/Cati/\\_tecnologias/manejo\\_conservacao\\_solo/AdequacaodeEstradasRurais.pdf](http://www.cati.sp.gov.br/Cati/_tecnologias/manejo_conservacao_solo/AdequacaodeEstradasRurais.pdf). Acesso em: 10 nov. 2021.

DURIGAN, G.; RAMOS, V. S. **Manejo adaptativo: primeiras experiências na restauração de ecossistemas**. São Paulo: Páginas & Letras, 2013. 65 p. Disponível em: [https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/wp-content/uploads/sites/234/2014/01/Manejo\\_Adaptativo\\_Primeiras\\_Experiencias\\_na\\_Restauracao\\_de\\_Ecossistemas.pdf](https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/wp-content/uploads/sites/234/2014/01/Manejo_Adaptativo_Primeiras_Experiencias_na_Restauracao_de_Ecossistemas.pdf). Acesso em: 04 maio 2022.

FERRAZ, R. P. D.; PRADO, R. B.; PARRON, L. M.; CAMPANHA, M. M. (ed.). **Marco referencial em serviços ecossistêmicos**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 20 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1110948/marco-referencial-em-servicos-ecossistemicos>. Acesso em: 04 set. 2022.

FERREIRA, M.; VIEIRA, D.; MALTA FILHO, E.; ROCHA, G.; MIRANDA, E.; ANTONIAZZI, L.; BASO, I. **Protocolo padrão de avaliação e manejo adaptativo para novos plantios com semeadura direta: iniciativa caminhos da semente**. São Paulo: Iniciativa Caminhos da Semente, 2020. 13 p. Disponível em: <https://www.caminhosdasemente.org.br/biblioteca?tag=Guia>. Acesso em: 06 jun. 2021.

FERREIRA JÚNIOR, L. G. (coord.). **Dinâmica das pastagens brasileiras: ocupação de áreas e indícios de degradação 2010-2018**. Chácaras Califórnia: LAPIG, 2020. 19 p. Disponível em: [https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/243/o/Relatorio\\_Mapai.pdf](https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/243/o/Relatorio_Mapai.pdf). Acesso em: 13 ago. 2022.

FILIZOLA, H. F.; ALMEIDA FILHO, G. S.; CANIL, K.; SOUZA, M. D. de; GOMES, M. A. F. **Controle dos processos erosivos lineares (ravinas e voçorocas) em áreas de solos arenosos**. Jaguariúna, SP: Circular Técnica 22. 2011. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/53751/1/Circular22.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2022.

HERNANI, L. C.; FREITAS, P. L.; PRUSKI, F. F.; MARIA, I. C. de; CASTRO FILHO, C.; LANDERS, J. C. A erosão e seu impacto. In: MANZATTO, C. V.; FREITAS, E. J.; PERES, J. R. R. (org.). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. p. 47-60.

IBGE. **Divisão regional do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/redes-geograficas/15778-divisoes-regionais-do-brasil.html?=&t=downloads>. Acesso em: 25 abr. 2023.

ILPF em números. Sinop, MT: Embrapa, 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/158636/1/2016-cpamt-ilpf-em-numeros.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2021.

INCRA. **Índices básicos por município**. Brasília, DF: Sistema Nacional de Cadastro Rural, 2013. Disponível em: [https://www.gov.br/incra/pt-br/acesso-a-informacao/indices\\_basicos\\_2013\\_por\\_municipio.pdf](https://www.gov.br/incra/pt-br/acesso-a-informacao/indices_basicos_2013_por_municipio.pdf). Acesso em: 25 abr. 2023.

LAPIG. Disponível em: <https://lapig.iesa.ufg.br/p/38972-atlas-das-pastagens>. Acesso em: 25 abr. 2023.

MARÇON, S.; FERREIRA, L. G. S. de (coord). **Agro legal: manual técnico operacional: orientações, diretrizes e critérios aplicáveis à recomposição da vegetação nativa**. São Paulo: Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente; Secretaria de Agricultura e Abastecimento. 2021. 157 p. Disponível em: [https://www.cati.sp.gov.br/portal/themes/unify/arquivos/produtos-e-servicos/MT%20Programa%20Agro%20legal%20web\\_compressed.pdf](https://www.cati.sp.gov.br/portal/themes/unify/arquivos/produtos-e-servicos/MT%20Programa%20Agro%20legal%20web_compressed.pdf). Acesso em: 24 abr. 2023.

MICCOLIS, A.; PENEIREIRO, F. M.; MARQUES, H. R.; VIEIRA, D. L. M.; ARCO-VERDE, M. F.; HOFFMANN, M. R.; REHDER, T.; PEREIRA, A. V. B. **Restauração ecológica com sistemas agroflorestais: como conciliar conservação com produção: opções para Cerrado e Caatinga**. Brasília, DF: Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal, 2016. 266 p. Guia técnico.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being: synthesis**. Washington, DC: Island Press, 2005. Disponível em: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2022.

MURADIAN, R.; CORBERA, E.; PASCUAL, U.; KOSSOY, N.; MAY, P. H. Reconciling theory and practice: an alternative conceptual framework for understanding payments for environmental services. **Ecological Economics**, v. 69, n. 6, p. 1202–1208, 2010.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Multi-functionality towards an analytical framework**. Paris: OECD, 2001. 160 p. Disponível em: [https://read.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/multifunctionality\\_9789264192171-en#page100](https://read.oecd-ilibrary.org/agriculture-and-food/multifunctionality_9789264192171-en#page100). Acesso em: 28 mar. 2022.

PEREIRA, L. C.; TOSTO, S. G.; CARVALHO, J. P. de. Erosão do solo e valoração de serviços ambientais. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B. de; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (ed.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 317-324. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/140992/1/2015CL15.pdf>. Acesso em: 06 set. 2022.

POLIDORO, J. C.; FREITAS, P. L. de; HERNANI, L. C.; ANJOS, L. H. C. dos; RODRIGUES, R. A. R.; CESÁRIO, F. V.; ANDRADE, A. G. de; RIBEIRO, J. L. The impact of plans, policies, practices and technologies based on the principles of conservation agriculture in the control of soil erosion in Brazil. *Authorea*, Apr. 21, 2020. Disponível em: <https://www.authorea.com/users/313628/articles/444131-the-impact-of-plans-policies-practices-and-technologies-based-on-the-principles-of-conservation-agriculture-in-the-control-of-soil-erosion-in-brazil>. Acesso em: 06 abr. 2023.

REIS, A.; BECHARA, F. C.; ESPÍNDOLA, M. B.; VIEIRA, N. K.; SOUZA, L. L. Restauração de áreas degradadas: a nucleação como base para incrementar processos sucessionais. *Natureza & Conservação*, v. 1, n. 1, p. 28-36, 2003.

RESCK, D. V. S. **A conservação da água via terraceamento em sistemas de plantio direto e convencional no cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. 8p (Embrapa Cerrados. Circular técnica, 22). Disponível em: [http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPAC-2009/24563/1/cirtec\\_22.pdf](http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPAC-2009/24563/1/cirtec_22.pdf). Acesso em: 27 abr. 2022.

RODRIGUES, R. R.; BRANCALION, P. H. S.; ISERNHAGEN, I. (org). **Pacto pela restauração da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. São Paulo: LERF/ESALQ; Instituto BioAtlântica, 2009. 256 p. Disponível em: <http://www.lerf.esalq.usp.br/divulgacao/produtos/livros/pacto2009.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2023.

RODRIGUES, R. R.; FARAH, F. T.; LAMONATO, F. H. F.; NAVE, A. G.; GANDOLFI, S.; BARRETO, T. E. **Adequação ambiental e agrícola: cumprimento da lei de proteção da vegetação nativa dentro do conceito de paisagens multifuncionais**. In: *Mudanças no código florestal brasileiro: desafios para a implantação da nova lei*. Rio de Janeiro: IPEA, 2016. v. 1, p. 159-184.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. **Resolução conjunta nº 4 de 01 de outubro de 2021**. Aprova o manual técnico operacional: volume I com as orientações, as diretrizes e os critérios aplicáveis à recomposição da vegetação nativa, para regularização ambiental dos imóveis rurais, os procedimentos para sua aplicação. Disponível em: [https://www.portaldocodigo.org/prs/sao\\_paulo/615c5138ed89f-615c5138ed8a0resolucao-saa-sima-no-4-de-10-de-outubro-de-2021.pdf](https://www.portaldocodigo.org/prs/sao_paulo/615c5138ed89f-615c5138ed8a0resolucao-saa-sima-no-4-de-10-de-outubro-de-2021.pdf). Acesso em: 27 abr.2022.

SALTON, J. C.; HERNANI, L. C.; FONTES, C. Z. (org.). **Sistema plantio direto: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 1998. 248 p. (Coleção 500 perguntas 500 respostas).

SEEG. **O que é o SEEG**. Disponível em: <https://seeg.obass.info/#que>. Acesso em: 04 set. 2022.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Regularização ambiental: boletim informativo: dados declarados até 01 de agosto de 2022**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/servico-florestal-brasileiro/boletim-informativo-car/BoletimCARAGOrevisadoatualizados.pdf>. Acesso em: 05 set. 2022.

SILVA, J. A. A. da; MANZATTO, C. V.; FRANCA, J. G. E.; CASTRO, M. R. C.; PEREIRA, S. E. M.; RODRIGUES, R. R. **Agronegócio: avanço social, econômico e ambiental para um Brasil mais sustentável**. In: ANDREOLI, C. V.; PHILIPPI JR., A. *Variações*. (org.). Sustentabilidade no agronegócio. São Paulo: Manole, 2021. v. 1, p. 52-97.

SILVA, J. A. A da; NOBRE, A. D.; MANZATTO, C. V.; JOLY, C. A.; RODRIGUES, R. R.; SKORUPA, L. A.; NOBRE, C. A.; AHRENS, S.; MAY, P. H.; SÁ, T. D. A.; CUNHA, M. C.; RECH FILHO, E. L. **O código florestal e a ciência: contribuições para o diálogo.** São Paulo. SBPC; ABC. 2011. 124 p. Disponível em: <http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-547.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2021.

SKORUPA, L. A.; MANZATTO, C. V. **Avaliação da adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) no Brasil.** In: SKORUPA, L. A.; MANZATTO, C. V. (ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. Estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impactos.** Brasília: DF, Embrapa, 2019b. Disponível em: <https://seeg.obass.info/#que>. Acesso em: 20 out. 2021.

SKORUPA, L. A.; MANZATTO, C. V. (ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil: estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impactos.** Brasília: DF, Embrapa, 2019a. Disponível em: <https://seeg.obass.info/#que>. Acesso em: 20 out. 2021.

SKORUPA, L. A.; VIEIRA, D. L. M.; KUHLMANN, M.; SAMPAIO, A. B.; MORAES, L. F. D. de; ISERNHAGEN, I.; RIBEIRO, J. F. **Roteiro para elaboração de um projeto de recomposição de áreas degradadas ou alteradas.** Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2021. 58 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 373).

SOUSA, A. P.; VIEIRA, D. L. M. **Protocolo de monitoramento da recomposição da vegetação nativa no Distrito Federal.** Brasília, DF: WWF, 2017. 19 p. Disponível em: <https://www.sema.df.gov.br/wp-content/uploads/2017/09/Cartilha-Protocolo-de-Monitoramento-Vegeta%C3%A7%C3%A3o-Nativa.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2023.

SOUSA, A. P.; VIEIRA, D. L. M. **Protocolo de monitoramento da recomposição da vegetação nativa em Mato Grosso.** São Paulo: The Nature Conservancy, 2018. 21 p. Disponível em: [https://www.webambiente.cnptia.embrapa.br/webambiente/wiki/lib/exe/fetch.php?media=webambiente:sousa\\_protocolo\\_mt\\_rev.pdf](https://www.webambiente.cnptia.embrapa.br/webambiente/wiki/lib/exe/fetch.php?media=webambiente:sousa_protocolo_mt_rev.pdf). Acesso em: 10 abr. 2023.

SOUSA, F. R. C.; PAULA, D. P. Análise de Perda do solo por erosão na bacia hidrográfica do rio Coreau (Ceará-Brasil). **Revista Brasileira Geomorfologia**, v. 20, n. 3, p. 491-507, 2019.

SPADOTTO, C. A.; RIBEIRO, W. C. (ed.). **Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria.** Botucatu: FEPAF, 2006. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/129661/1/2006OL-003.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2022.

TONIOLO, B. P.; PAIXÃO, B. M.; CUNHA E SILVA, D. C.; MEDEIROS, G. A.; PECHE FILHO, A.; RIBEIRO, A. I. Análise espacial de perda de solo por erosão na bacia hidrográfica do rio Jundiá-Mirim – SP. **Revista Brasileira de Desenvolvimento Territorial Sustentável GUAJU**, v. 7, n. 2, p. 209-236, jul./dez. 2021.

UFMG. **Boletim informativo.** Balanço do código florestal, vol. 1. Disponível em: [https://csr.ufmg.br/csr/wp-content/uploads/2022/08/boletim\\_cf\\_vol.1.pdf](https://csr.ufmg.br/csr/wp-content/uploads/2022/08/boletim_cf_vol.1.pdf). Acesso em: 25 abr. 2023.

VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; PULROLNIK, K.; GUIMARÃES JÚNIOR, R. **Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária: histórico e evolução no Cerrado.** In: SKORUPA, L.A.; MANZATTO, C.V. (ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. Estratégias regionais de transferência de tecnologia, avaliação da adoção e de impactos.** Brasília: DF, Embrapa, 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/208899/1/Skorupa-Sistemas-Integracao-LV-2020-paginas-341-380.pdf>. Acesso em: 20 out. 2021.

WADT, P. G. S. **Construção de terraços para controle da erosão pluvial no estado do Acre. Rio Branco: Embrapa Acre, 2004. 44 p.** (Embrapa Acre. Documentos, 85). Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPAF-AC/10514/1/doc85.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2022.

WEBAMBIENTE. **Adequação ambiental nas mãos do produtor.** Disponível em: <https://www.webambiente.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 10 mar. 2022.

THE WORLD BANK. **Who cares wins: connecting financial markets to a changing world** (English). Washington, D.C.: World Bank Group, 2004. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/280911488968799581/Who-cares-wins-connecting-financial-markets-to-a-changing-world>. Acesso em: 05 abr. 2022.



# USO DE RESÍDUOS COMO FERTILIZANTES E/OU CONDICIONADORES DO SOLO: BIOCARVÃO E BIOSSÓLIDOS

*Adriana Marlene Moreno Pires, Ruan Carnier, Aline Peregrina Puga, Alice Watte Schwingel, Rosana Faria Vieira, Marcos Antonio Vieira Ligo e Cristiano Alberto de Andrade*

## INTRODUÇÃO

Resíduo é definido como o material resultante de atividades antrópicas, gerado como sobra de um processo produtivo, ou que não pode ser utilizado com a finalidade para a qual foi originalmente produzido (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004). Sua destinação consiste em um problema sério, com potencial geração de impactos ambientais negativos se não for realizada adequadamente. O ideal seria destruí-lo, o que dificilmente é possível, de maneira que a principal destinação tem sido seu armazenamento de forma segura. Essa opção não é sustentável, uma vez que a geração de resíduos é contínua e cada vez mais locais de armazenamento são necessários.

A melhor solução para a destinação de resíduos é seu reaproveitamento, tornando-os subprodutos. Os esforços em promover a reciclagem de resíduos têm crescido nas últimas décadas, e sua importância se consolida ao se tornar ponto comum nos principais modelos econômicos e de gestão da atualidade, como economia verde, economia circular e ESG.

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA – define **Economia Verde** como uma economia que promove o bem-estar da humanidade e a igualdade social, ao mesmo tempo em que reduz riscos ambientais e escassez ecológica. As principais diretrizes são baixa emissão de carbono, uso eficiente de recursos naturais e inclusão social (Organização das Nações Unidas, 2011). O uso de recursos naturais é ineficiente na economia linear, uma vez que esta tem como base recursos geralmente não renováveis e que não são repostos. Na economia verde, o aproveitamento de resíduos é fator inquestionável para melhoria da eficiência no uso de recursos. O mesmo se aplica para a economia circular, que tem como uma de suas diretrizes a manutenção de produtos, componentes e materiais de um sistema de produção no mais alto nível de utilidade e valor pelo maior tempo possível (Webster, 2015).

O termo ESG (Environmental, Social and Governance ou Ambiental, Social e Governança, em português) consiste em um conjunto de critérios que pode ser aplicado internamente em uma empresa, direcionando suas decisões, ou pode ser utilizado para avaliar empresas externamente. O ESG tem como base a adoção, pela empresa, de práticas que sejam socialmente responsáveis, sustentáveis, minimizando possíveis impactos ambientais negativos, além de bons processos de gestão. Como a própria definição indica, a ESG tem como base 3 pilares: ambiental, social e de governança. Nos critérios de ESG, são abordados diferentes aspectos relacionados ao reaproveitamento de resíduos, como disposição adequada, diminuição do uso de recursos renováveis e promoção da reciclagem.

O fato de que o mercado está cada vez mais exigente quanto à sustentabilidade ambiental e social das cadeias produtivas direcionando a economia acaba promovendo o aproveitamento racional e responsável dos recursos naturais e, consequentemente, a reciclagem de resíduos.

Provavelmente o uso de resíduos mais antigo e difundido é como fertilizante e/ou condicionador de solos agrícolas. Por exemplo, existem relatos de que a disposição de esgotos na agricultura é uma prática muito antiga, sendo que as informações mais conhecidas são as originárias da China. No ocidente sabe-se que, na Prússia, a irrigação com efluentes de esgotos era praticada desde 1560 (Camargo et al., 2008). A prática tem como objetivo melhorar atributos agronômicos do solo, principalmente a fertilidade, resultando no aumento da produtividade das plantas.

No passado, utilizou-se o solo também como depurador dos resíduos, em áreas denominadas como “de sacrifício”. Atualmente, essa prática é ilegal na maioria dos casos, partindo-se do princípio de que o solo é um recurso natural que deve ser preservado. Portanto, a aplicação de um resíduo ao solo agrícola só deve ser realizada se forem comprovados benefícios agrícolas, sem prejuízos ambientais.

Particularmente para o Brasil, o uso de fontes alternativas é estratégico para diminuir a dependência por insumos importados. Em 2022, o Brasil importou 5,25 milhões de toneladas de nitrogênio (N); 4,34 milhões de toneladas de fosfato ( $P_2O_5$ ) e 7,00 milhões de toneladas de  $K_2O$ , que correspondem a respectivamente 91, 74 e 97% do total utilizado no país (Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2022).

Uma estimativa realizada por Benites et al. (2010) indicou que a quantidade anual de nutrientes excretada pelo rebanho industrial de suínos e aves brasileiro corresponde a aproximadamente 27%, 21% e 12% do total anual consumido de N, P e K pela agricultura brasileira. É interessante destacar que existem vários outros resíduos com potencial de uso agrícola gerados em grandes quantidades, como do rebanho bovino confinado de corte e leiteiro, resíduos sólidos urbanos, lodo de esgoto ou biossólido e resíduos de indústrias alimentícias. Portanto, a utilização de resíduos como fonte alternativa de nutrientes tem grande potencial

em diminuir a vulnerabilidade do Brasil em relação à dependência por insumos agrícolas importados.

Um outro ponto importante quanto ao uso agrícola de resíduos refere-se àqueles de matriz orgânica, pois outros ganhos precisam ser considerados.

Os solos tropicais são predominantes no Brasil e possuem características morfológicas, químicas e físicas bem distintas entre si. No entanto, são considerados, em sua maioria, solos muito intemperizados, com baixa fertilidade e baixos teores de matéria orgânica (Zaroni; Santos, 2021). A construção da fertilidade em solos tropicais e o consequente aumento de sua capacidade produtiva têm como pilar o aumento do armazenamento e a melhoria da qualidade da matéria orgânica (MO) estocada no solo. O componente orgânico do solo desempenha importante papel na eficiência do uso de corretivos e fertilizantes, além de promover maior sustentabilidade e resiliência dos sistemas produtivos (Silva et al., 2022; Cerri et al., 2022). A adição de resíduos orgânicos, portanto, pode resultar no aumento dos teores de carbono estocado e, conseqüentemente, de matéria orgânica do solo.

Assim, o uso de resíduos em solos agrícolas relaciona-se com a agricultura de baixo carbono, uma vez que se reduz a pressão ambiental por fontes não renováveis de nutrientes, cujos processos de produção e transporte demandam energia de origem fóssil e resultam em emissões de gases de efeito estufa; e há possibilidade de estabilização de parte do carbono dos resíduos de matriz orgânica no solo (sequestro de carbono). Além disso, para várias avaliações de desempenho ambiental, como a Análise de Ciclo de Vida (ACV), resíduos apresentam emissão zero de carbono na sua geração, uma vez que as emissões do processo produtivo são associadas ao(s) produto(s).

O interesse de consumidores (do mercado externo e interno) nos produtos gerados por cadeias produtivas que levam em consideração a questão climática e a contabilidade de balanços de carbono mais favoráveis nos sistemas de produção em geral é força motriz importante na mudança da agricultura.

Embora tenham sido discutidos vários pontos positivos quanto ao uso agrícola de resíduos, o fato é que esse ainda não é expressivo no Brasil. O uso desses subprodutos na agricultura aumentou nos últimos anos, mas continua muito aquém do potencial que o país apresenta.

O baixo índice de reaproveitamento de resíduos orgânicos na agricultura nacional é resultado de inúmeros aspectos, podendo-se citar o modelo agrícola fundamentado em fontes solúveis de nutrientes e maquinários adaptados a esta situação, elevada umidade e desbalanço de nutrientes, dificuldades logísticas, baixa tecnificação e insuficientes incentivos públicos.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Brasil, 2010) não teve o efeito esperado quanto à promoção do aproveitamento de resíduos. Entretanto, recentemente foi publicado o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) (Brasil, 2022), que criou

expectativa por estabelecer metas de aumento do reaproveitamento de resíduos e incluir incentivos fiscais como promotores dessa atividade.

Em 2022 foi publicado o Plano Nacional de Fertilizantes – PNF (Brasil, 2021) com os objetivos de fortalecer políticas de incremento da competitividade da produção e da distribuição de fertilizantes no Brasil de forma sustentável, ordenando ações públicas e privadas para ampliar a produção competitiva de fertilizantes (abrangendo adubos, corretivos e condicionadores) no Brasil; de diminuir a dependência externa tecnológica e de fornecimento, mitigando os impactos de possíveis crises; e de ampliar a competitividade do agronegócio brasileiro no mercado internacional, respeitando as regulamentações ambientais (Brasil, 2022).

No PNF foram contempladas cadeias emergentes de fertilizantes, inclusive de uso de resíduos (subprodutos) como fertilizantes. Foram estabelecidas metas que têm como objetivo ampliar o uso de subprodutos como fertilizante, incluindo fomento ao crédito, criação de linhas de financiamento especiais, redução de tributação e incentivos fiscais para as atividades de produção de fertilizantes a partir de subprodutos, distribuídas em diferentes horizontes de tempo (2025, 2030, 2040 e 2050).

Em um cenário muito favorável à consolidação da cadeia de produção de fertilizante e condicionadores de solo a partir de resíduos, espera-se que o reaproveitamento passe a ser prática comum na agricultura brasileira, resultando em benefícios agrícolas, ambientais e em menor vulnerabilidade do país às flutuações de oferta e de preços de insumos agrícolas.

Entre os subprodutos citados e discutidos no PNF estão o biossólido e o biocarvão, sobre os quais muitos estudos foram realizados pela equipe da Embrapa Meio Ambiente e parceiros, devido ao grande potencial de uso como fertilizante.

## BIOSSÓLIDO

O lodo de esgoto é um resíduo gerado no tratamento do esgoto sanitário doméstico, que conta com processos físicos, químicos e biológicos (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2020). A principal etapa de tratamento do esgoto sanitário refere-se ao processo biológico adotado, uma vez que em termos de disponibilidade de oxigênio, tempo de detenção, entre outros, são bastante variáveis. A separação da carga orgânica do efluente tratado consiste na floculação da carga biológica ativada e do material orgânico na presença de oxigênio, cujos flocos são decantados em sequência. Esse lodo decantado deve ainda passar por etapas adicionais para redução de umidade e de patógenos, viabilizando seu uso agrícola como biossólido (BS) (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, 2023; Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2020). Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (2023), a produção nacional anual de BS corresponde a 2,5 milhões

de toneladas, volume esse que tende a aumentar em função do Marco Legal do Saneamento, disposto pela lei nº 14.026 de 2020 com o objetivo de viabilizar a universalização do sistema de saneamento no Brasil (BRASIL, 2020a).

Em função do volume crescente, na medida em que o país avança com sua rede sanitária, o destino final adequado desse material torna-se um desafio. Há que se ressaltar que a gestão de resíduos geralmente ocorre no âmbito municipal, em que a população em geral é mais sensível a outras prioridades, como transporte público, educação e saúde, o que também é um entrave a ações práticas efetivas.

A maior parte do lodo atualmente gerado é destinada para aterros sanitários, o que não é a melhor alternativa, visto que os aterros têm vida útil limitada e os custos de logística são elevados. Além disso, existem alternativas mais nobres e eficientes de destinação que contribuem para a sustentabilidade e para a economia circular (Mosquera-Losada et al., 2017). O próprio termo “biossólido” foi criado para trazer o conceito de uso ou reciclagem benéfica do material orgânico resultante do tratamento dos esgotos (United States Environmental Protection Agency, 1995). Em termos de uso ou reciclagem benéfica, a aplicação do BS no solo agrícola aparece como excelente alternativa para aumentar o teor de matéria orgânica do solo e a disponibilidade de nutrientes como nitrogênio (N) e fósforo (P) (Andrade et al. 2013; Boeira, 2004; Bettiol; Camargo, 2006; Carvalho et al., 2015).

Atualmente, para o aproveitamento agrícola do BS, existem dois principais caminhos regidos pela legislação pertinente. A primeira alternativa é a utilização do BS propriamente dito, cuja caracterização e aplicação devem ocorrer segundo os critérios técnicos estabelecidos na Resolução nº 498 de 2020 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (2020). Nesta resolução, são relacionados os parâmetros a serem avaliados no BS, o cálculo da dose, além do protocolo de monitoramento das áreas sob aplicação, visando garantir o uso eficiente e ambientalmente seguro. A composição do BS é aspecto bastante relevante, uma vez que descartes industriais clandestinos podem ocorrer na rede de coleta do esgoto domiciliar, introduzindo contaminantes, principalmente metais pesados (Bettiol; Camargo, 2006; Nascimento et al., 2020).

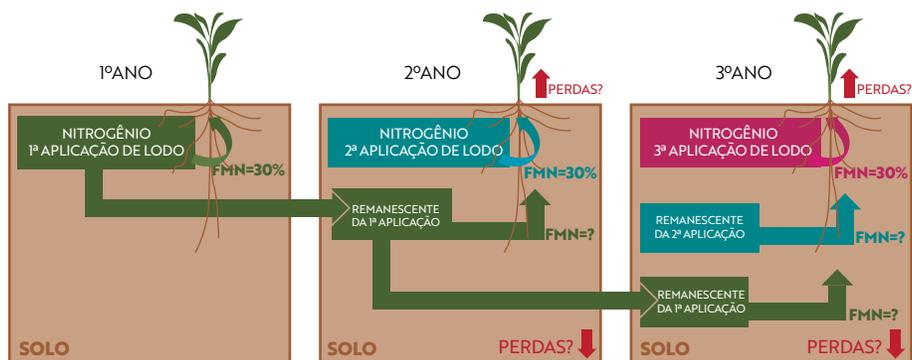
A compostagem do biossólido pode ser usada como tratamento adicional para um material mais estável e seguro para aplicação no solo agrícola. Na compostagem há degradação biológica aeróbia de parte da carga orgânica do biossólido em mistura com outra(s) biomassa(s) (resíduos vegetais, serragem, e outros), visando a produção de um material orgânico mais estável, sem odor e livre de patógenos (Proença et al., 2021). Além disso, a compostagem tem sido descrita como processo eficiente na degradação de compostos farmacológicos que podem estar presentes no biossólido (Dalahmeh et al., 2022).

A segunda alternativa para o uso agrícola do BS é o registro como produto junto ao Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa), que deve ser enquadrado nas catego-

rias existentes de acordo com as instruções normativas (IN). Atualmente, as categorias são: fertilizante orgânico, regulamentado pela IN nº 7 (Brasil, 2023) e IN nº 61 (Brasil, 2020b); condicionador de solo, segundo a IN nº 35 (Brasil, 2006); e substrato para plantas, regido pela IN nº 5 (Brasil, 2016). As instruções normativas estabelecem, dentre outras questões, as definições, especificações, garantias e tolerâncias para o produto registrado no Mapa, assegurando o uso do produto. Existe ainda uma terceira opção, ainda emergente no país, que é a produção de biocarvão à base de BS, mas este tema será tratado em tópico específico deste capítulo. O potencial agrícola dos bio sólidos, bem como suas características, serão ilustrados nos tópicos seguintes.

## IMPACTO DO USO DO BIOSSÓLIDO EM ATRIBUTOS DO SOLO E NA PRODUÇÃO VEGETAL

Um dos principais critérios para o uso do BS no solo refere-se ao fornecimento de N às culturas, o que orientou e tem orientado o dimensionamento da dose e a frequência para aplicação. O BS entra na substituição total ou parcial dos fertilizantes minerais. A reciclagem do N a partir do BS tem apelo atual ainda maior, considerando os preços dos fertilizantes minerais, as questões político-econômicas associadas à cadeia de distribuição e à dependência externa (Chojnacka et al., 2023) e o impacto no balanço favorável de carbono do sistema ou produto agrícola (Krahembuhl, 2021). A dose de BS recomendada baseia-se, em geral, na necessidade de N da cultura e na fração de mineralização (FM) do BS em função do tipo de BS ou, preferencialmente, determinada em ensaio controlado de laboratório (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2020). É importante considerar que no campo podem ocorrer consideráveis flutuações das condições climáticas, que estimulam ou atrasam a mineralização do N no campo, resultando em certa divergência entre o período de maior demanda de N pela cultura e a disponibilização de N a partir do BS. O gerenciamento sobre as condições climáticas não é possível, e, por isso, é fundamental o adequado dimensionamento da demanda de N pela cultura e um valor mais assertivo para a FM, evitando-se excesso de N no sistema ou mesmo a falta para a nutrição eficiente da cultura (Figura 3.1). No caso de superestimativa da dose ou falta de sincronização entre a mineralização e a demanda de N pela cultura, quantidades excessivas de  $\text{NO}_3^-$  presentes na solução do solo podem lixiviar no perfil do solo ou desnitrificar, contaminando águas subterrâneas ou causando a emissão de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), respectivamente (Yoshida et al., 2018). O BS geralmente é também rico em fósforo (P), o que o torna excelente opção para a reciclagem e manutenção desse nutriente no solo, haja vista os níveis disponíveis geralmente insuficientes, notadamente em solos ácidos, que abrangem grande parte do território nacional (Alovisi et al., 2020).



**Figura 3.1.** Representação do possível excesso de nitrogênio inorgânico em função da mineralização de N proveniente de 3 aplicações consecutivas de lodo de esgoto. O valor de FMN adotado para cada nova adição do resíduo foi de 30%, assumindo-se que esta porcentagem atende a demanda da cultura. Não foram estabelecidos valores de FMN para o lodo remanescente de aplicações anteriores, bem como estimativas de perdas via emissão atmosférica ou lixiviação.

Fonte: Pires; Andrade (2014).

A seguir, serão descritos uma série de resultados dos experimentos envolvendo a aplicação de BS, desenvolvidos na Embrapa Meio Ambiente ou com participação de pesquisadores da Unidade. Os primeiros trabalhos descrevem o uso de BSs provenientes da estação de tratamento de esgoto (ETE) de Barueri (LB), que recebe BS doméstico e industrial, e da ETE de Franca (LF), que recebe somente BS doméstico.

A época do ano é um importante fator a ser considerado na determinação da dose de BS a ser recomendada para determinada cultura. Isto foi demonstrado por Vieira e Cardoso (2003), que avaliaram os teores de N em área cultivada com milho, no período da seca e das águas, após a aplicação de doses crescentes do LB no solo (Tabela 3.1). O BS foi aplicado pela primeira vez em abril de 1999, no período da seca e, posteriormente, em dezembro de 1999, no período das águas. Na primeira avaliação verificou-se que as quantidades de N mineral no solo foram bem superiores em todos os tratamentos com o LB, em relação ao tratamento com fertilização mineral (Tabela 3.1). Para a época das águas, diferenças em relação à fertilização mineral somente foram consistentes em relação às duas maiores doses de lodo de esgoto (Tabela 3.2). Em face destes resultados, pode-se pressupor que, no período da seca, o solo ainda apresentava um teor de umidade suficiente para que o processo de mineralização do N orgânico ocorresse, mas insuficiente para causar grandes perdas desse elemento, principalmente por lixiviação. Por outro lado, no período das águas, as baixas concentrações de N mineral encontradas em todos os períodos de avaliação demonstram possíveis perdas desse elemento para o ambiente.

**Tabela 3.1.** Teores de N mineral em solo cultivado com milho que recebeu doses de biossólido (lodo de esgoto da ETE de Barueri – LB) no período da seca.

Tratamentos	Dias após a emergência							
	10	24	45	66	87	108	129	150
FNM	19,33	5,33	4,67	10,33	9,33	11,67	5,33	4,34
L1B	58,00 a	21,00 a	39,33 a	26,33 a	15	13	11	22,67 a
L2B	87,33 a	44,00 a	53,67 a	58,67 a	34,33 a	33,00 a	21,67 a	16,42 a
L4B	141,33 a	81,67 a	99,33 a	112,00 a	67,33 a	69,00 a	75,00 a	104,67 a
L8B	324,33 a	133,00 a	179,67 a	213,67 a	99,00 a	170,67 a	203,33 a	204,35 a

FNM, fertilização nitrogenada mineral; L1B, dose de lodo calculada para fornecer à cultura a mesma quantidade de N do tratamento FNM; L2B, L4B, L8B; 2, 4 e 8 vezes a quantidade de lodo do tratamento L1B. Médias seguidas pela mesma letra a, em cada época, diferem significativamente da média do tratamento FNM (Teste de Dunnett,  $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Vieira; Silva (2003).

**Tabela 3.2.** Teores de N mineral em solo cultivado com milho que recebeu doses de biossólido (lodo de esgoto da ETE de Barueri – LB) no período das águas.

Tratamentos	Dias após a emergência					
	18	60	81	102	123	144
FNM	5,62	4,33	14	8,01	8,01	5,34
L1B	3,97	2,67	12	8,34	7,01	7,01
L2B	13,2	2,34	17,34	8,34	14,34	14,00 a
L4B	24,38 a	5,67	20	12,34	18,67 a	15,67 a
L8B	47,36 a	9,01	41,34 a	15,67	30,00 a	35,34 a

FNM, fertilização nitrogenada mineral; L1B, dose de lodo calculada para fornecer à cultura a mesma quantidade de N do tratamento FQ; L2B, L4B, L8B; 2, 4 e 8 vezes a quantidade de lodo do tratamento L1B. Médias seguidas pela mesma letra a, em cada época, diferem significativamente da média do tratamento FNM (Teste de Dunnett,  $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Vieira; Silva (2003).

As frequências anuais de aplicações e os efeitos residuais de nutrientes presentes no LE são, também, fatores que devem ser considerados no cálculo da dose a ser recomendada, uma vez que o N orgânico não mineralizado no ciclo anterior da cultura pode tornar-se disponível para o próximo cultivo. Vieira et al. (2014) avaliaram o efeito residual de sucessivas aplicações de LE com relação ao N e ao P disponível. Neste experimento, foram utilizados o LB e o LF em duas doses (Tabela 3.2). O LB foi aplicado do ano de 1999 até 2003. A aplicação do LF foi feita desde 1999, com ausência de aplicação nos anos agrícolas 2004/2005 e 2005/2006. Nos anos agrícolas de

2006/2007 e 2007/2008, esse BS foi novamente aplicado. As avaliações foram feitas no ano agrícola de 2007/2008.

**Tabela 3.3.** Teores de N mineral no solo a 0 – 10 cm de profundidade nos tratamentos com dois tipos de biossólido (lodo de esgoto de Barueri – LB; e lodo de esgoto de Franca – LF) e épocas de avaliação no ano agrícola 2007/2008.

Tratamentos	Antes da aplicação	Dias após a aplicação do lodo					
		5	10	13	18	34	56
Controle	31,8 a	33,8 cd	73,3 c	42,0 bc	34,0 d	36,6 bc	38,1 bc
FQ	30,3 a	33,1 cd	69,9 c	38,7 c	34,8 d	35,9 bc	24,1 e
L1B	31,0 a	33,2 cd	64,3 c	44,1 bc	45,7 bcd	36,5 bc	32,0 cde
L2B	36,5 a	34,4 cd	81,5 bc	36,1 c	32,9 d	38,4 abc	33,3 cde
L1F	29,9 a	45,3 bc	127,6 b	53,6 b	56,1 b	54,7a	42,7 ab
L2F	33,3 a	100,9 a	184,6 a	86,0 a	106,0 a	41,3 abc	50,4 a

Controle, tratamento sem LE e sem fertilização mineral; FNM, fertilização nitrogenada mineral; L1B e L1F, dose de lodo calculada para suprir a necessidade em N da cultura N; 2LB e 2LF, duas vezes a dose de N para suprir a necessidade da cultura. Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas em cada coluna não diferem significativamente entre si (teste LSD,  $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Vieira et al. (2014).

Anteriormente à aplicação do LF e da semeadura do milho, foi feita a primeira coleta de solo para determinação dos teores de N mineral no solo sob os diferentes tratamentos. Nenhum efeito residual relativo a esse elemento foi observado para os dois LEs nas duas doses (Tabela 3.3). Estes resultados se repetiram para o LB em todas as avaliações, sugerindo que o solo apresentava alta capacidade de suprir esse elemento, conforme demonstrado pelos teores de N nos tratamentos controle e com fertilização mineral. Tal fato sugere a necessidade de também avaliar o potencial de mineralização do N orgânico original do solo na definição da dose de LE a ser recomendada. Por outro lado, maiores concentrações de N no solo foram obtidas após a aplicação do LF, relativas às médias dos tratamentos controle e fertilização nitrogenada mineral, em todos os períodos de avaliação. Considerando que no início do ciclo da cultura o requerimento de N pela planta é baixo, há maior risco de perda de N no ambiente.

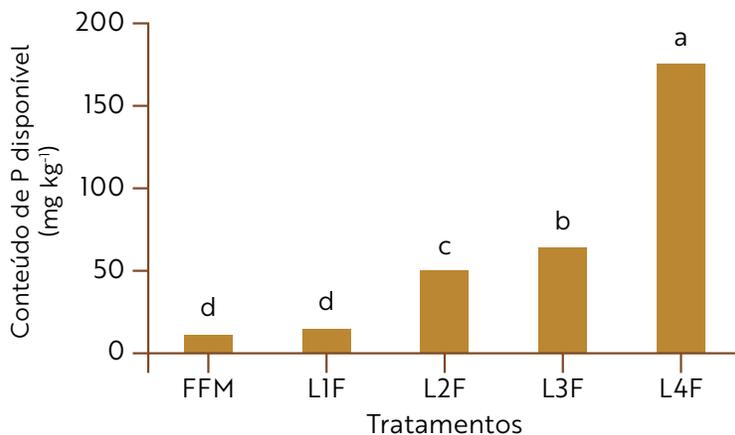
Ainda nesse experimento, as maiores produtividades do milho (dados não apresentados) foram observadas nos tratamentos com as doses do LB em relação ao tratamento controle, o que indica um efeito além do N disponibilizado. Esse efeito foi atribuído à disponibilização de P pelo LB (Tabela 3.4), ressaltando a necessidade de considerar o impacto da aplicação do lodo sobre outros nutrientes e atributos do solo, o que pode ser monitorado por meio de avaliações frequentes da fertilidade do solo.

**Tabela 3.4.** Teores de P disponível<sup>(1)</sup> no solo quantificado no ano agrícola 2007/2008 em área cultivada com milho, antes de uma nova suplementação do solo com lodo de esgoto.

Controle	FQ	L1F	L2F	L1B	L2B
07/ago	07/ago	07/ago	07/ago	07/ago	07/ago
<b>P disponível (mg kg<sup>-1</sup>)</b>					
3,0 c	16,0 b	20,0 b	39,3 a	22,0 b	49,3 a

1. Extração por Mehlich 1. Controle, tratamento sem LE e sem fertilização mineral; FNM, fertilização nitrogenada mineral; L1B e L1F, dose de lodo calculada para suprir a necessidade em N da cultura N; L2B e L2F, duas vezes a dose de N para suprir a necessidade da cultura. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem significativamente entre si. (Teste LSD,  $p \leq 0,05$ ).  
Fonte: Vieira et al. (2014).

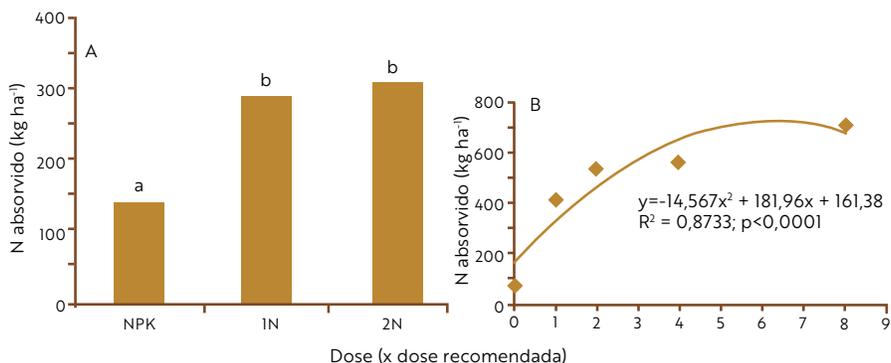
O efeito residual para o P em função de sucessivas aplicações de biossólido no solo também foi demonstrado por Vieira e Pazianotto (2016). As doses do LF utilizadas foram calculadas tomando-se como base a FM do N orgânico e a recomendação de N para a cultura (Figura 3.2). O LF foi aplicado desde 1999, sendo a última aplicação realizada no ano agrícola de 2003/2004. As avaliações foram realizadas em 2006, antes da semeadura do milho na safra de verão. A quantidade de P disponível no solo que recebeu a menor dose de BS evidenciou alto componente residual desse elemento, sem exceder as quantidades obtidas pela fertilização mineral. As altas concentrações nos demais tratamentos com os biossólidos demonstram o alto potencial do lodo em melhorar a capacidade do solo em fornecer fósforo.



**Figura 3.2.** Teor de fósforo disponível em função da aplicação adubação mineral e orgânica via biossólido. FFM, fertilização fosfatada mineral; L1F, quantidade de lodo calculada em função da necessidade da planta em N e da FM do lodo; L2F, L3F, L4F, 2, 4 e 8 vezes a dose L1F. Médias seguidas por letras diferentes diferem significativamente entre si (Teste LSD,  $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Vieira; Pazianotto (2016).

O potencial em fornecer nutrientes para culturas e melhorar as características do solo também é evidenciado por outros autores. Martins et al. (2015), por exemplo, avaliaram o efeito da aplicação de BS no estado nutricional de cafeeiros comerciais já em produção há dois anos. Os autores observaram que os níveis para os atributos do solo (exceto o enxofre) e também para os nutrientes nas folhas estavam de acordo com os valores obtidos normalmente para as plantas de café. Em dois experimentos de longa duração com doses anuais de bioossólido para o cultivo de milho, Pires et al. (2015) avaliaram a aplicação da dose recomendada correspondente ao fornecimento de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N, e 2, 4 e 8 vezes essa dose em área localizada em Jaguariúna, SP; e 120 e 240 kg ha<sup>-1</sup> de N via aplicação de bioossólido (1 e 2 vezes a dose recomendada, respectivamente) em área localizada em Campinas, SP. Pires et al. (2015) observaram que a absorção de N pelas plantas foi influenciada pela dose de BS aplicado, sendo que no experimento em Campinas (Figura 3.3A) a dose de N via BS disponibilizou o dobro do nutriente para as plantas, em relação à adubação mineral. No experimento em Jaguariúna (Figura 3.3B), os autores observaram absorção de N de até 6 vezes a dose recomendada, ilustrado pela equação quadrática ajustada aos dados. Segundo Pires et al. (2015), a principal vantagem é o efeito residual do bioossólido, que é mais eficiente em fornecer N para as culturas ao longo do tempo em relação à adubação mineral.

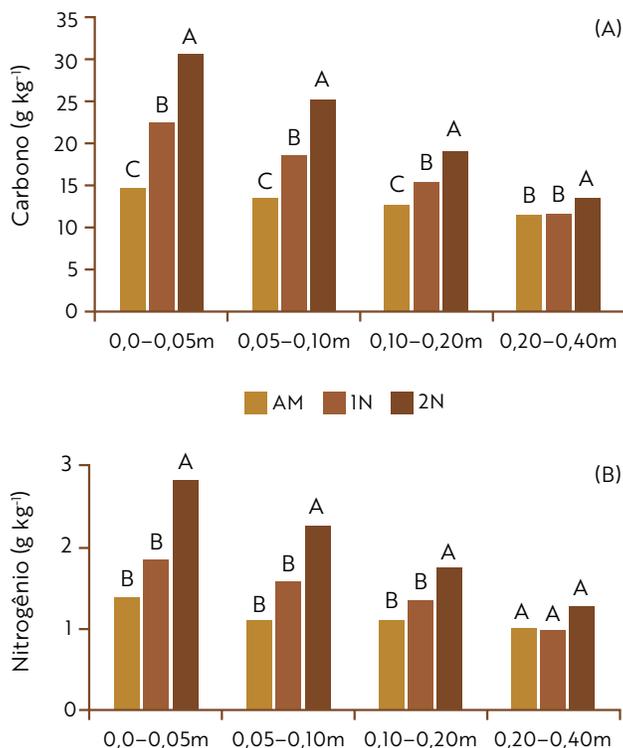


**Figura 3.3.** Nitrogênio absorvido por plantas de milho (*Zea mays*) em função da aplicação de doses de lodo de esgoto nos experimentos realizados no Instituto Agrônomico (A) e na Embrapa Meio Ambiente (B).

Fonte: Adaptado de Pires et al. (2015).

O efeito do teor de matéria orgânica na melhoria estrutural e química do solo foi avaliado por Guimarães et al. (2022), cujo estudo investigou, durante oito meses, o efeito de bioossólido, composto orgânico e adubação mineral na recuperação química de amostras de Latossolo, Cambissolo e estéril de mina, representativos de área de mineração em Minas Gerais. As coletas realizadas pelos autores após a aplicação dos tratamentos ilustraram a capacidade do BS no incremento de matéria orgânica,

N total, P e K disponíveis e cálcio (Ca) trocável. O incremento de carbono (C) e N no solo após aplicação de BS também foi avaliado por Carvalho (2015), cuja pesquisa comparou a dose de lodo (N), equivalente a 80 e 120 kg ha<sup>-1</sup> de N recomendada para a cultura do milho, o dobro dessa dose (2N), e a adubação mineral tradicional (AM). A autora observou que o incremento ocorreu principalmente até a camada de 0,20 m (Figura 3.4), cuja diferença para o C se mostrou mais intensa em relação ao N. Carvalho (2015) ainda destaca que, para a dose recomendada para a cultura do milho, não houve diferença entre a fonte mineral e o BS no fornecimento de N. Além disso, o incremento de matéria orgânica proporcionado pelo BS foi verificado para as frações mais humificadas, segundo Carvalho (2015), cujo carbono tende a se concentrar na fração humina, permanecendo mais estabilizado no solo.



**Figura 3.4.** Teores totais de carbono (A) e de nitrogênio (B) no solo até 0,40 m de profundidade em função da aplicação de adubo mineral (AM) e lodo de esgoto (1N e 2N) em Latossolo Vermelho eutroférrico, Campinas, SP.

Fonte: Adaptado de Carvalho (2015).

A adição de BS visando o incremento de matéria orgânica e estoque de carbono no solo norteou diversos estudos, que avaliaram não só os benefícios ao sistema solo-planta, mas também os potenciais impactos ao ambiente em função de suas características. A matéria orgânica aplicada via BS pode contribuir para o estoque de carbono no solo, auxiliando na mitigação do efeito estufa. No entanto, devido às elevadas concentrações de C e N, o manejo agrícola do BS pode estimular a emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e também de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), cujo potencial de aquecimento global é 298 vezes maior do que o do  $\text{CO}_2$ , transformando a condição do solo de dreno para emissor de gases de efeito estufa (GEE) (Grutmacher, 2016). Os estoques e emissões de C e N após a aplicação de biossólido no solo foram investigados por Pitombo (2011), cujo estudo comparou a dose recomendada para a cultura do milho ( $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  em base seca), o dobro dessa dose, e a fonte mineral de N (controle) que visava fornecer  $120 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . O autor observou incremento para ambos os estoques de C e N após a aplicação de BS em relação ao controle, com aumentos de 70 e 41% para C, e 69 e 42% para N, para as camadas de 0–20 e 20–40 respectivamente. Com relação às emissões, Pitombo (2011) verificou que os valores foram variáveis em função da condição de umidade, e dessa forma ponderou as emissões pelo período úmido e seco em função da precipitação (Tabela 3.5). Como resultado, Pitombo (2011) descreve que as emissões de  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2\text{O}$  foram semelhantes às encontradas para florestas de condição úmida e para o metano ( $\text{CH}_4$ ), o solo se tornou um dreno nas condições avaliadas, independente do tratamento.

**Tabela 3.5.** Fluxo ponderado de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$  nos tratamentos com adubação mineral, dose recomendada de lodo e o dobro da dose recomendada.

Tratamento	Fluxo ponderado	
	t C $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$	t eq $\text{CO}_2$ $\text{ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$
	$\text{CO}_2$	
Controle	4,88	17,9
1L	7,3	26,78
2L	8,67	31,78
	$\text{N}_2\text{O}$	
Controle	0,15	68,54
1L	0,37	172,84
2L	0,83	390,28
	$\text{NH}_4$	
Controle	-0,86	-28,75
1L	-0,69	-23
2L	-0,36	-12

Controle = Adubação mineral de N; 1L = dose recomendada; 2L = dobro da dose recomendada.

Fonte: Adaptado de Pitombo (2011).

O monitoramento da emissão de GEE em duas áreas experimentais após a aplicação de BS foi estudada por Grutzmacher (2016), cujo trabalho avaliou as emissões residuais em áreas sem aplicação de BS por um período (5 anos em Campinas e 3 anos em Jaguariúna) e também após a aplicação recente. A autora comparou os tratamentos com aplicação de BS com a adubação mineral, sendo ambos como fonte de N para a cultura do milho, cujas doses avaliadas são as mesmas descritas por Pires et al. (2015), apresentado anteriormente. Grutzmacher (2016) observou que as maiores emissões de CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>O devido ao uso de BS são observadas para as aplicações recentes, e tendem a se igualar à fonte mineral ao longo do tempo, enquanto para o CH<sub>4</sub> houve o consumo no solo. Os principais picos de emissão ocorrem após período de chuva que, segundo a autora, é fator preponderante para a emissão de GEE. Grutzmacher (2016) ainda calculou o fator de emissão para o N<sub>2</sub>O, com valores variando entre 1,19% para Campinas e 1,5% para Jaguariúna, acima do valor considerado default pelo IPCC (1%), embora apresente grande incerteza (0,3 – 3,0%). Os resultados observados pela autora indicaram que o N<sub>2</sub>O proporcionou maior potencial de aquecimento global, respondendo por cerca de 99%. Dessa forma, Grutzmacher (2016) recomenda a utilização de BS com características de maior estabilidade, que permitam maior acúmulo de C e N no solo para compensar as emissões. Esse fato foi observado por Krahembuhl (2021), que ao comparar diversas formas para disposição final do BS, verificou que o uso agrícola do BS compostado resultou em maior estabilização de C no solo, resultando em menor emissão.

Além das emissões de GEE, a concentração de metais presentes no lodo que podem ser disponibilizados para o ambiente também é foco de pesquisas e monitoramento. Esse tópico é particularmente importante para solos de clima tropical, cujas características possibilitam maior lixiviação de íons e, conseqüentemente, a contaminação de águas subterrâneas. Borba et al. (2018), por exemplo, avaliaram o conteúdo de metais na solução de um solo que recebeu BS durante 10 anos (2003–2013) e verificaram que os teores de cádmio (Cd) e de chumbo (Pb) estavam acima do limite de potabilidade durante todo o monitoramento. Por outro lado, Ribeirinho (2015), ao avaliar a mesma área, verificou que os teores semi-totais encontrados no solo não ultrapassaram os limites estabelecidos pela legislação, o que pode ser explicado pela proteção da matéria orgânica através dos macroagregados (Domingues, 2013). Borba et al. (2018) ainda destacam que, durante a aplicação de BS, a matéria orgânica adicionada é responsável pelo aumento da densidade de cargas negativas no solo e, conseqüentemente, o aumento da retenção de metais.

Baseando-se em todos esses benefícios supracitados relacionados à matéria orgânica proveniente dos BS, esses materiais também têm sido misturados a fontes minerais para a produção de fertilizantes organominerais, cujo princípio é aproveitar o conteúdo de matéria orgânica e obter um produto eficientemente competitivo

e com valor agregado. Rodrigues et al. (2021) avaliaram a aplicação de três formas físicas (pó, grânulo e pellet) de fertilizante organomineral produzido a partir de BS e fontes inorgânicas em comparação com a adubação mineral tradicional no desenvolvimento da soja em dois solos distintos. Os autores indicam que as formas físicas do fertilizante organomineral foram equivalentes em relação aos resultados para os atributos avaliados, e foram eficientes em promover acúmulo de nutrientes nas plantas, bem como o aumento no número de nodulações e vagens da soja. As características químicas e físicas da cana-de-açúcar fertilizada com organomineral à base de BS foram investigadas por Gonçalves et al. (2021), cujos resultados ilustraram equivalência entre a fertilização por organomineral e tradicional mineral tanto para os atributos de produtividade (peso de colmos  $\text{ha}^{-1}$ , produtividade da cana-de-açúcar, quantidade de açúcar  $\text{ha}^{-1}$ ), quanto para as propriedades físico-químicas do caldo de cana (Pol, Brix, Pureza e Fibra).

Baseado em Kominko et al. (2021), as principais desvantagens da produção de fertilizantes organominerais a partir de biossólidos são a composição variável dos biossólidos, a presença potencial de contaminantes, falta de incentivos e de confiança pelos consumidores. Por outro lado, os autores elencam como vantagens a reciclagem de nutrientes e matéria orgânica, redução da utilização das fontes minerais comerciais, produto com valor agregado e os princípios alinhados com a economia circular.

Esses resultados aqui apresentados ilustram os potenciais impactos associados ao uso agrícola dos biossólidos, cujas características influenciam os atributos químicos e físicos do solo, além da produtividade das culturas. Os resultados são observados para uma gama de condições diferentes, seja para solos de texturas contrastantes, ou mesmo sob climas distintos. Além disso, a adição de biossólidos ao solo agrícola pode contribuir para a redução dos custos com adubação mineral e para a sustentabilidade do sistema agrícola.

## BIOSSÓLIDOS E ATIVIDADE DE MICRORGANISMOS DO SOLO

A avaliação de indicadores microbiológicos em solos suplementados com BS pode ser utilizada para monitorar o impacto ambiental desse resíduo, uma vez que os microrganismos são essenciais para a ciclagem de nutrientes. Vieira e Pazianotto (2016) avaliaram alguns parâmetros microbiológicos em área cultivada com milho, que havia recebido várias doses anuais do LF. A frequência de aplicação e os tratamentos foram os mesmos descritos no item anterior por esses mesmos autores. Os parâmetros avaliados foram a respiração basal (RB), o N imobilizado pela biomassa microbiana ( $N_{mic}$ ), o C da biomassa microbiana ( $C_{mic}$ ) e a hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA). A RB e o FDA referem-se, respectivamente, à mineralização do C orgânico do solo e à atividade total dos microrganismos. A RB, a hidrólise do FDA

e o  $N_{mic}$  aumentaram com as doses crescentes de LE (Tabela 3.6). Este tipo de resposta pode estar associado aos maiores teores de C orgânico no solo, obtidos em decorrência de aplicações sucessivas do LE. Substratos carbonáceos são essenciais para o metabolismo energético da microbiota heterotrófica do solo. A ausência de resposta do  $C_{mic}$  entre os tratamentos sugere que mudanças na estrutura e na composição dos microrganismos pode ter ocorrido em função das diferentes doses do LE. Esta hipótese não foi avaliada no presente estudo. Contrários a esses resultados, Vieira e Silva (2003) relataram que a atividade dos microrganismos diminuiu com o aumento das doses do LB, conforme foi demonstrado pelo decréscimo na atividade da desidrogenase (dados não apresentados), que é uma enzima presente apenas nas células viáveis. É importante salientar que, no estudo de Vieira e Pazianotto (2016), o montante de aplicação do LF foi bem maior que a quantidade utilizada com o LB, além de possuírem atributos químicos diferentes. Trabalhos futuros deveriam considerar tais características para melhor entendimento do efeito da aplicação de LE ao solo sobre a atividade dos microrganismos.

**Tabela 3.6.** Carbono da biomassa microbiana ( $C_{mic}$ ), nitrogênio da biomassa microbiana ( $N_{mic}$ ), respiração basal (RB), atividade de hidrólise do FDA e percentagem de C orgânico em solo suplementado com doses crescentes de lodo.

Tratamentos	$C_{mic}$	$N_{mic}$	RB	FDA	C orgânico
	—mg kg <sup>-1</sup> —		µg C-CO <sub>2</sub> g <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	µg fluoresceína g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>	%
FQ	227 b	19,33 b	7,40 c	7,66 bc	2,84 cd
L1F	313 ab	19,93 b	8,81 bc	7,26 c	2,71 d
L2F	309 ab	28,52 a	9,02 bc	8,98 ab	2,94 c
L3F	325 ab	29,21 a	10,57 ab	9,24 a	3,15 b
L4F	308 a	25,35 ab	15,05 a	10,30 a	3,82 a

Para abreviações ver Figura 3.1 Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna não diferem significativamente (Teste LSD,  $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Vieira; Pazianotto (2016)

Em decorrência da ausência de resultados consistentes que permitam a recomendação inequívoca de inoculação do feijoeiro com rizóbios, em substituição aos fertilizantes nitrogenados, são requeridas formas alternativas que aumentem a fixação biológica de  $N_2$  (FBN) por esta leguminosa são requeridos. Uma possível estratégia para potencializar a FBN no feijoeiro, seria aumentar a atividade dos rizóbios nativos, uma

vez que os solos brasileiros apresentam elevada população desses microrganismos. Esta pressuposição foi confirmada por Vieira et al. (2005), em experimento de casa de vegetação. Os tratamentos utilizados estão descritos na Tabela 3.7. Os resultados relativos aos tratamentos L1B, L2B e IN, com respeito aos números de nódulos, às massas de nódulos secos e às atividades da nitrogenase, demonstram que as estirpes nativas de rizóbio podem ser tão eficientes quanto as estirpes selecionadas quando condições adequadas de expressão do seu alto potencial de fixação de  $N_2$  são fornecidas

**Tabela 3.7.** Número de nódulos, massa dos nódulos secos e atividade de redução do acetileno em plantas de feijão cultivadas em solo submetido a diferentes tratamentos com lodo de esgoto. Avaliação feita aos 46 dias após a emergência.

Tratamentos	Nódulos	Massa de nódulos	Atividade redução acetileno
	Número vaso <sup>-1</sup>	mg vaso <sup>-1</sup>	$\mu\text{g C}_2\text{H}_2 \text{ h}^{-1} \text{ vaso}^{-1}$
FQ	134,66 bc	169,67 b	10,36 bc
L1B	390,00 a	390,47 a	37,80 a
L2B	237,67 b	394,03 a	37,72 a
L3B	18,67 d	24,73 c	4,76 c
IN	487,33 a	307,17 ab	24,42 ab

FQ, fertilização química; L1B, dose de lodo calculada para fornecer a metade do N requerido para a cultura; L2B e L3B, dose de lodo calculada para fornecer a quantidade recomendada de N mineral e duas vezes esta quantidade; IN, plantas inoculadas com estirpes de rizóbio recomendadas e fertilização química, exceto a nitrogenada.

Médias seguidas pelas mesmas letras na coluna não diferem significativamente entre si (Teste de Duncan,  $p \leq 0,05$ ).

Fonte: Vieira et al. (2005)

Leguminosas que dependem da FBN para a aquisição de N apresentam maior requerimento em P do que plantas que recebem adubação com N mineral, em função da grande demanda energética envolvida na simbiose, na qual aquele elemento tem papel preponderante. Vieira (2001) e Vieira et al. (2004) avaliaram o efeito da aplicação do LB, como fonte de P, no processo simbiótico na cultura da soja e em sua produtividade. Os experimentos foram conduzidos em duas etapas: uma sob condição de casa-de-vegetação, e outra, a campo. Em casa-de-vegetação, oito tratamentos foram impostos, conforme descrito na Tabela 3.8. O experimento a campo foi constituído por cinco tratamentos (Tabela 3.9). No ensaio conduzido em casa-de-vegetação, verificou-se que aplicações do LB, em baixas doses, como fonte de P, estimularam o crescimento da cultura, sem prejuízo para o processo simbiótico (Tabela 3.8).

**Tabela 3.8.** Peso da parte aérea seca (PPAS), peso das vagens (PVS), número de nódulos (NN), peso dos nódulos secos (PNS) e atividade da nitrogenase em soja cultivada com diferentes doses de lodo de esgoto, em experimento de casa de vegetação.<sup>1</sup>

Tratamentos	PPAS	PVS	NN		PNS		AN µmoles C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> hr <sup>-1</sup> vaso <sup>-1</sup>
	g vaso <sup>-1</sup>	g vaso <sup>-1</sup>	g vaso <sup>-1</sup>		g vaso <sup>-1</sup>		
			49 DAE	63 DAE	49 DAE	63 DAE	
FQ	17,17 b	1,47 d	-	-	-	-	-
IN - P	8,89 c	1,51 d	48,00 aB	122,67 bA	0,23 bB	0,51 cA	-
IN + P	17,36 b	3,35 a	82,50 aB	177,00 aA	0,57 aB	1,13 aA	-
IN + LiB	17,33 b	3,16 ab	51,75 aB	142,75 abA	0,39 abB	0,85 bA	-
IN + L2B	20,03 a	3,68 a	60,50 aB	175,75 aA	0,38 abB	0,87 bA	-
SIN + LiB	17,41 b	2,62 bc	-	-	-	-	-
SIN + L2B	18,59 ab	2,12 cd	-	-	-	-	-

FQ, fertilização química, IN-P, inoculação sem adição de fertilizante fosfatado (FP); IN+P, inoculação + dose recomendada de FP; IN+LiB, inoculação + lodo de esgoto em dose calculada segundo a necessidade da planta em P; IN+L2B, inoculação + duas vezes a dose LiB; SIN+LiB, sem inoculação + dose LiB; SIN+L2B, sem inoculação + dose L2B. – ausência de nódulos. PPAS, peso da parte aérea seca; PVS, peso das vagens secas; NN, número de nódulos; PNS, peso dos nódulos secos; AN, atividade da nitrogenase. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, ou maiúscula na linha dentro das variáveis NN e PNS, não diferem significativamente entre si (Teste de Duncan,  $p \leq 0,05$ ).

Esses resultados foram confirmados em experimento a campo onde as doses de BS foram também calculadas em função da recomendação de P para a cultura. As sementes de soja foram inoculadas conforme recomendação. O experimento foi conduzido em dois anos agrícolas, ou seja, 2000/2001 e 2001/2002, e o BS foi aplicado somente no primeiro ano. As produtividades da soja em função dos tratamentos são mostradas na Tabela 3.9. Verifica-se que o efeito da aplicação do LB prolongou-se até o segundo ano de cultivo, demonstrando seu efeito residual em relação ao P. A baixa produtividade no ano agrícola 2000/2001 pode ser decorrente do período de estiagem que ocorreu após a semeadura da soja.

**Tabela 3.9.** Produtividade de grãos de soja (kg ha<sup>-1</sup>) em solo submetido a diferentes doses de LB, em experimento a campo.

Tratamentos	Ano agrícola	
	2000/2001	2001/2002
Testemunha (T)	1498 d	2685 b
FQ	1877 ab	2967 ab
IN + Lo	1554 cd	2629 b
IN + L1B	1623 bcd	2773 ab
IN + L2B	2079 a	3099 a
IN + L3B	2002 a	3118 a
I + FQ	1814 abc	3048 a

T, sem fertilização química ou lodo; FQ, fertilização química completa; IN+Lo, inoculação sem aplicação de lodo; IN+L1B, inoculação mais dose 1 de lodo; IN+L2B, inoculação mais dose 2 de lodo; IN+L3B, inoculação mais dose 3 de lodo; IN+AQ, inoculação mais fertilização química, exceto a nitrogenada.

## BIOCARVÃO

O biocarvão (*biochar* em inglês) é um material sólido, rico em carbono (C), obtido a partir da conversão termoquímica de biomassa(s) em ambiente com concentração limitada de oxigênio (Lehmann; Joseph 2009; International Biochar Initiative, 2015). Esse material pode ser usado diretamente na agricultura, principalmente no solo, ou ser usado na composição de outros insumos, como adsorventes e fertilizantes, com amplo potencial de uso agrícola no condicionamento do solo, remediação de ambientes contaminados e mitigação de gases de efeito estufa (GEE) (International Biochar Initiative, 2015).

O interesse pela obtenção e uso do biocarvão (BC) para fins agrícolas e ambientais evoluiu a partir de estudos sobre a Terra Preta de Índio (TPI). As TPIs são solos antropogênicos de alta fertilidade da região amazônica e, de forma geral, são caracterizados pela coloração escura, presença de material arqueológico (fragmentos cerâmicos e artefatos líticos), altas concentrações de matéria orgânica do solo (MOS) e nutrientes (P, Ca, Mg, Zn, etc.), em função da deposição de material orgânico decomposto, cinzas e principalmente carvão (Falcão et al., 2009; Kernet et al., 2009).

A produção de BC pode ser alternativa para a reciclagem de grandes quantidades de resíduos agrícolas e biomassas diversas (Abdelhazef et al., 2014), diminuindo a contaminação associada ao descarte para o ambiente (Ahmad et al., 2014). A conversão de biomassa residual em BC por meio da pirólise também promove a eliminação de patógenos (Ahmad et al., 2014), além da remoção de antibióticos e imobilização de metais pesados (Tian et al., 2019).

A pirólise é uma tecnologia alternativa que é custo-efetiva e limpa, sendo possível reciclar materiais e reduzir os resíduos sólidos (Tian et al., 2014). Durante esse processo são produzidas três fases: gasosa (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, dentre outros) – biogás; sólida – bio-

carvão; e líquida (alcatrões, hidrocarbonetos mais pesados e água) – bio-óleo (Basu, 2013). Os gases gerados durante o processo podem ser capturados e condensados (em bio-óleo e gás de síntese), e utilizados como fonte de energia renovável (Ahmad et al., 2014; Verde e Chiaromonti, 2021). A planta de pirólise, se acoplada à fonte geradora de resíduo, e, possivelmente, próxima a áreas de agricultura passíveis de recebimento e/ou consumo desse material, reduz os custos de transporte, simplifica a logística e favorece de forma racional a implementação da produção e uso do BC. Ademais, a energia produzida pela pirólise ainda pode ser utilizada em outros processos *in situ*.

As características do BC variam em função das condições de pirólise (Tabela 3.1), como temperatura ( $\cong 350\text{ }^{\circ}\text{C} - 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e tempo (pirólise rápida ou lenta), da biomassa e da granulometria da matéria-prima (Paz-Ferreiro et al., 2014). No processo de pirólise, há reações de polimerização e formação de estruturas aromáticas de C, termicamente estáveis e altamente recalcitrantes quanto à mineralização no solo (Spokas et al. 2012; Lehmann e Joseph, 2015; Lal, 2016). As estruturas aromáticas policondensadas, estabelecidas com ligações C-C, têm menores relações H/C e O/C na comparação com a biomassa original (Uchimiya et al., 2011), resultando em elevada meia-vida no ambiente, em comparação com a biomassa original (Spokas et al., 2012).

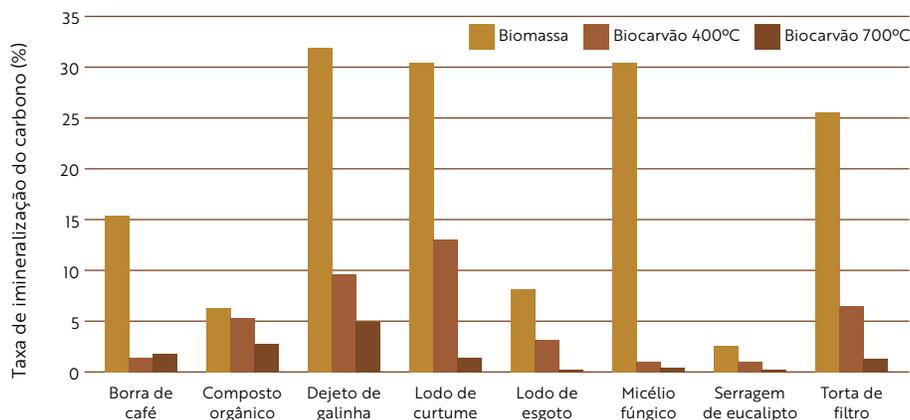
**Tabela 3.10.** Caracterização do biocarvão de palha de cana-de-açúcar produzido em quatro temperaturas de pirólise.

Atributo	Temperatura de pirólise ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	400	500	600	700
pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	8,6	9,8	9,7	10,1
CTC ( $\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )	29	31	18	13
Cinza (%)	11,3	11,7	13,1	13,2
C (%)	67	71	74	73
H (%)	3,5	2,6	1,7	0,9
N (%)	1,3	1,2	1,2	1,1
O (%)	13,8	10,7	6,3	6,7
P (%)	1,1	1,2	1,1	1,1
K (%)	15	19	18	22
Ca ( $\text{g kg}^{-1}$ )	6,8	7,4	9,1	9,5
Mg ( $\text{g kg}^{-1}$ )	1,9	2,4	2,6	2,8

Fonte: Adaptado de Melo et al. (2013).

A taxa de mineralização do C do BC, ou seja, a quantidade de C liberada como  $\text{CO}_2$  na decomposição aeróbia de seu conteúdo, é reduzida na ordem de 70% em comparação com a biomassa original (Figura 3.1), e esse efeito é mais pronunciado quanto maior a temperatura de pirólise (Bibar, 2014). Em meta-análise sobre mineralização do C de BCs, 3% foi a taxa de mineralização média encontrada, o que

significa que 97% do C é estável após aplicação no solo, com um tempo médio de residência de 556 anos (Wang et al., 2016). Os trabalhos conduzidos na Embrapa Meio Ambiente desde 2012 indicam o uso de valor conservativo igual a 10% como o máximo para decomposição de sua carga orgânica após aplicação no solo, o que significa que 90% do C aplicado deve configurar como sequestro de C (Andrade et al., 2015; Andrade e Puga, 2023; Bibar, 2014; Grutmacher et al., 2018; Tozzi et al., 2019).



**Figura 3.5.** Taxas de mineralização de biomassas e biocarvões obtidos por meio de pirólise a 400 °C e 700 °C. Fonte: Adaptado de Bibar (2014).

A recalitrância do BC é uma característica fundamental para que este seja considerado como estratégia mitigadora do aquecimento global. O próprio Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC) reconhece o biocarvão como tecnologia para sequestro de C (Calvo Buendía et al., 2019), sendo uma opção estratégica no ambiente terrestre (Minx et al., 2018).

Nesse contexto, o BC pode ser utilizado como condicionador de solo, que é definido como produto que promove a melhoria das propriedades físicas, físico-químicas ou atividade biológica do solo, podendo recuperar solos degradados ou desequilibrados nutricionalmente (Brasil, 2006). Devido aos grupos funcionais de superfície e a estrutura porosa do BC, sua aplicação ao solo afeta as propriedades químicas e físicas do solo, tais como aumento da CTC (Andrade et al., 2015; Butnan et al., 2015; Tozzi et al., 2019), aumento da retenção de água e nutrientes (Lucon, 2019; Paz-Ferreiro et al., 2014) e fertilização do solo (Sohi, 2012). Além disso, o BC adsorve metais pesados em sua superfície e reduz a concentração disponível em solo contaminado (Puga et al., 2015; Carnieret al., 2022). Segundo Park et al. (2011) sua aplicação em alguns solos pode melhorar os parâmetros físicos, químicos e biológicos.

Os incrementos da CTC do solo, em função da aplicação de BC, ocorrem em consequência da elevação do pH e da alteração do teor de C no solo, e a intensidade deste efeito depende do solo, do tipo de BC e da dose (Andrade et al., 2015; Domingues et al. 2020). Andrade et al. (2015) constataram, em experimento em laboratório, elevação da CTC efetiva de um Latossolo Vermelho-Amarelo com aplicação de doses de BC de cama de frango (pirólise lenta a 400 °C). O aumento observado foi de 5, 11, 21 e 42% para doses correspondentes a 4,7; 9,3; 18,6 e 37,2 t ha<sup>-1</sup> de BC, respectivamente. O próprio envelhecimento do biocarvão no solo resulta num adicional de CTC com o tempo, pois há oxidação de grupos funcionais de superfície e formação de compostos fenólicos, carboxílicos, carbonílico, quinonas, fenólicos e grupos funcionais hidroxila (Paz-Ferreiro et al., 2014).

Para avaliação do envelhecimento do BC e o efeito na CTC em estudo em laboratório durante 360 dias, Tozzi et al. (2019) variaram fatores abióticos (umidade e temperatura) bem como a presença e ausência de solo e observaram que apenas o fator tempo se destacou. Os autores observaram aumento de 100 mmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> em um ano, o que representou aumento de 50% nas cargas superficiais, devido ao processo de envelhecimento do BC pela formação de grupamentos superficiais (carboxílico, fenólico e carbonílico), e, provavelmente esse efeito será em longo prazo e contínuo em função do C estável do BC.

Em função de sua natureza porosa, em consequência das estruturas celulares da biomassa de origem e do próprio processo de pirólise, o BC tem potencial para modificar a CRA do solo. Muitos estudos nos quais o BC afetou a produtividade das culturas citaram a retenção de água como um fator chave nos resultados, sendo que essa modificação da estrutura física do solo pode resultar, concomitantemente, em aumento dos nutrientes na solução do solo (Sohi et al., 2010).

Apesar da retenção de água no solo ser passível de ser aumentada pelo uso do BC, geralmente esse efeito é verificado apenas com aplicação de doses altas ( $\geq 15$  t ha<sup>-1</sup>), e a resposta a esta prática é frequentemente menor em solos argilosos (Blanco-Canqui, 2017).

Em extensa revisão bibliográfica, Blanco-Canqui (2017) observou que 90% dos estudos concluíram que o BC é capaz de aumentar a retenção de água no solo, e em 72% dos casos revisados (n = 20) houve aumento de água disponível para as plantas, variando entre 4 e 130%. Os argumentos para esse efeito são o aumento da área superficial específica (ASE) e da porosidade do BC.

Há, ainda, evidências de que a aplicação de BC no solo pode reduzir a severidade de doenças foliares e doenças transmitidas por microrganismos de solo em várias culturas; e que as características do BC afetam sua capacidade de supressão de doenças (Jaiswal et al., 2014), como observado por Silva et al. (2020) após aplicação de biocarvão de eucalipto em tomate com murcha de *Fusarium*. Os possíveis mecanismos

pelos quais o BC pode proteger as plantas contra doenças são: i) fornecimento de nutrientes e melhoria da nutrição das plantas; ii) alterações na biomassa e comunidade microbiana do solo; iii) absorção pelo BC de toxinas produzidas por microrganismos que causam doenças no solo; e iv) indução de mecanismos de defesa sistêmicos das plantas (Graber e Elad, 2013).

Ademais, no tocante a outras aplicações do BC, há pesquisas quanto à aplicação no processo de compostagem demonstrando múltiplos benefícios, como: melhoria no desempenho da compostagem, diminuição da volatilização de amônia ( $\text{NH}_3$ ), redução da emissão de metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), diminuição da toxicidade de  $\text{NH}_3$  para os microrganismos e aumento da retenção de N no composto (Agyarko-Mintah et al. 2017; Janczak et al. 2017; Sanchez-Monedero et al. 2018).

Um gargalo quanto ao uso do BC como condicionador, além da própria produção, é a recomendação de doses elevadas (acima de  $10\text{ t ha}^{-1}$ ) para o alcance de algum benefício agrônômico. Além disso, ressalta-se um possível entrave na aplicação pelo pequeno tamanho de suas partículas e baixa densidade, podendo haver deriva pelo vento. Essa baixa densidade e a granulometria fina também são desafios para o transporte, pois parte pode ser perdida nas estradas e o custo fica elevado pelo alto volume e pouca massa transportada.

Além da possibilidade de aplicar o BC em solo como condicionador, é possível, também, o aplicar de forma conjunta ao fertilizante mineral ou orgânico. Ao utilizar fertilizante marcado com  $^{15}\text{N}$ , Steiner et al. (2010) verificaram que a eficiência de uso de N (EUN) foi 18% maior nas parcelas que receberam NPK e BC em comparação com as parcelas que receberam somente NPK. É possível, ainda, produzir fertilizante à base de BC com tratamento de pré ou pós-pirólise (Joseph et al. 2013; Zheng et al., 2017). Os fertilizantes produzidos à base de BC também podem apresentar eficiência aumentada (Chunxue et al, 2015; Puga et al., 2020a) ou liberação lenta (Zhou et al., 2015; Wen et al., 2017; Sharkawi et al., 2018; Puga et al., 2020b). O efeito do BC no aumento da EUN está, pelo menos parcialmente, relacionado com fenômenos de carga de superfície, o que pode também viabilizar o uso direto do BC no campo, como condicionador de solo, e a obtenção dos benefícios associados à EUN quando se utilizam fontes nitrogenadas convencionais nestas áreas. A liberação lenta e o consequente aumento na EUN quando o fertilizante nitrogenado é aplicado em conjunto com o biocarvão, ou quando a fonte mineral é formulada com o biocarvão, pode explicar a redução na emissão de um importante gás de efeito estufa (Grutzmacher et al., 2018), o  $\text{N}_2\text{O}$ , ou a menor intensidade de emissão desse gás, bem como a redução na volatilização de amônia ou atraso nesse processo (Puga et al., 2020a; 2020b).

Essas soluções são importantes, pois a aplicação exclusiva de BC geralmente não é suficiente para o fornecimento adequado de nutrientes às plantas, mesmo em doses elevadas (acima de  $30\text{ t ha}^{-1}$ ), além de inviável economicamente. Por fim, uma vanta-

gem adicional desses fertilizantes inovadores é a carga orgânica que pode impactar o ambiente edáfico de forma positiva, principalmente considerando o efeito cumulativo do BC em função da natureza recalcitrante de seus compostos de C, podendo ainda contribuir para o sequestro de C.

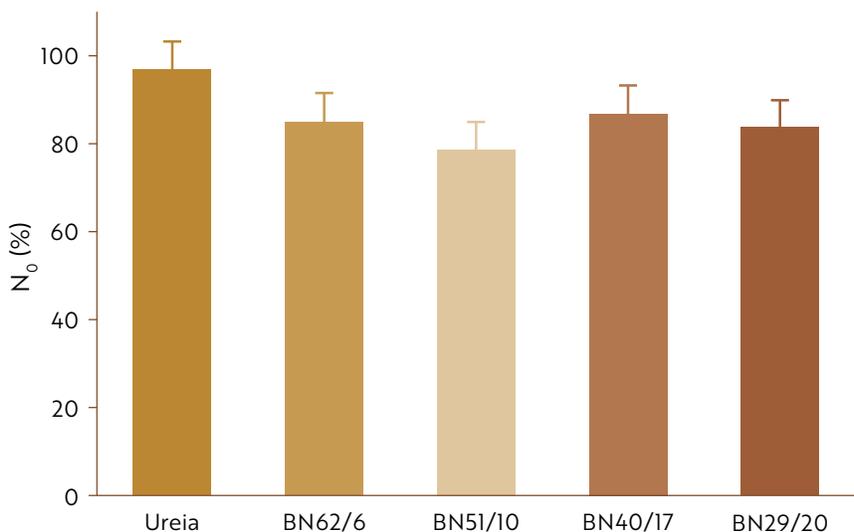
O BC pode ser misturado com fertilizantes NPK e outros materiais aditivos (amidos, argilas, alginato, e outros) para produzir fertilizantes organominerais. De acordo com a Instrução Normativa nº 25 do Mapa, os fertilizantes organominerais para aplicação no solo devem ter no mínimo 8% de C orgânico, no máximo 30% de umidade e CTC de no mínimo 80 mmolc kg<sup>-1</sup>. Se os produtos forem produzidos com macronutrientes primários e comercializados isoladamente (N, P, K) ou em misturas (NP, NK, PK ou NPK), devem ter no mínimo 10% deste(s) elementos (Brasil, 2009).

Os resultados de pesquisa publicados quanto à performance de fertilizantes com BC em sua formulação são bastante promissores. A eficiência agronômica do N (EAN: kg grão kg<sup>-1</sup> N) no arroz foi de 74,4% pelo fertilizante à base de BC (BC + bentonita + NPK) comparado ao NPK nos estudos de Joseph et al. (2013). Da mesma forma, Zheng et al. (2017) verificaram incremento de 10,7% na produtividade do milho e de 40% na EAN pelo fertilizante à base de BC (BC + bentonita + DAP + KCl), comparado à ureia-formaldeído. A EUN pela aplicação desses novos fertilizantes pode ser aumentada (Biederman e Harpole, 2013) devido à elevada adsorção de amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) pelo BC (Clough et al., 2013) e subsequente redução da lixiviação de N (Borchard et al., 2012).

No Brasil há disponibilidade de aproveitamento de um resíduo, finos de carvão, proveniente do processo de pirólise, para produção de carvão vegetal, ou seja, um BC propriamente dito. O carvão é utilizado prioritariamente em grande escala como fonte de calor e monóxido de C em altos-fornos para produção de aço (Protasio et al., 2014), em substituição ao coque de carvão mineral, principalmente na produção de ferro-gusa (Manzoni; Barros, 2015). A geração dos finos de carvão se dá na proporção de 150 kg por tonelada de carvão produzido (Benites et al., 2009), sendo que parte (20–40%) é redirecionada para o processo de injeção de finos, ou comercializados na forma de briquetes (Centro de Gestão e Estudos Estratégicas, 2015), constituindo excedente desse subproduto sem finalidade específica. Segundo Benites et al. (2009) o desenvolvimento de processos que permitam transformar o carvão e seus subprodutos em compostos com características apropriadas, para o uso como condicionadores do solo e fertilizantes, como reatividade e estabilidade, é estratégico para o setor florestal brasileiro.

Nesse contexto, Puga et al. (2020b), em estudo em laboratório com diversas formulações de fertilizante à base de BC (BN) na forma de finos de carvão (combinação de BC, fertilizantes minerais nitrogenados e bentonita), observaram que esses produtos liberaram N de forma mais lenta que a ureia, com taxas de liberação até 60% menores. Na Figura 3.2, é possível observar o valor do N potencialmente liberável (N<sub>o</sub>), estimado

através de modelo de cinética química com os dados do estudo de lixiviação no solo, em que se constatou a diferença dos fertilizantes quanto à disponibilidade do nutriente. Ressalta-se que as maiores concentrações de BC no fertilizante proporcionaram menores valores de  $N_0$ .

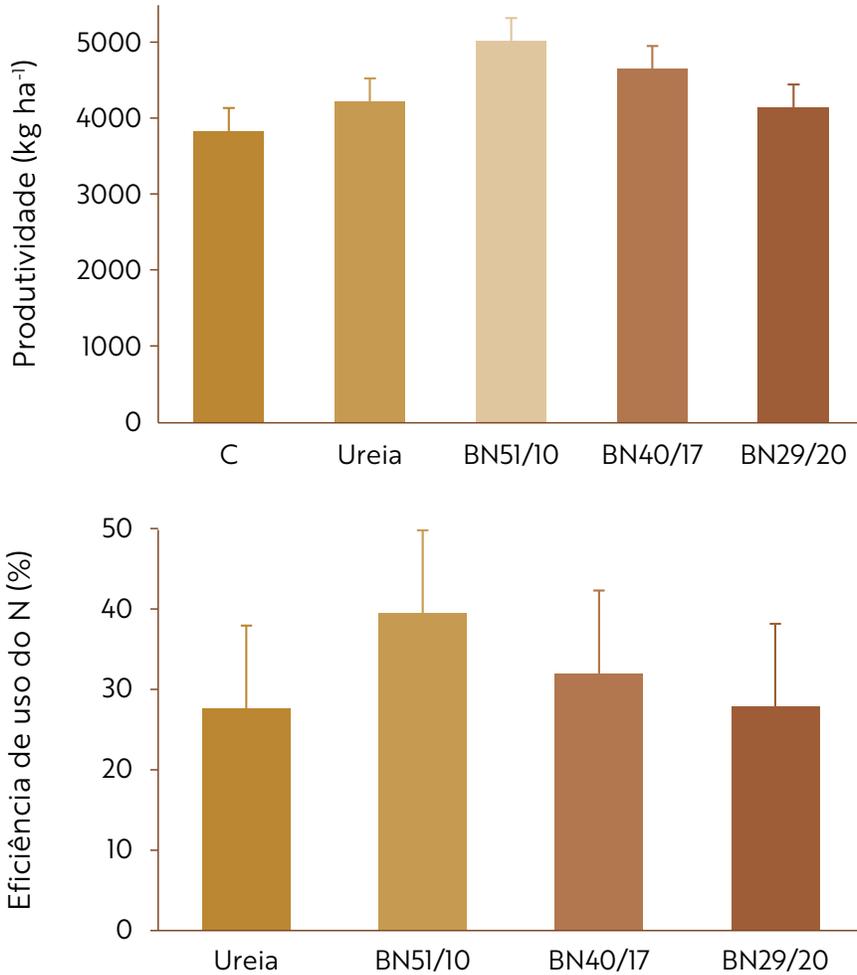


**Figura 3.6.** N potencialmente liberável ( $N_0$ ) da ureia e dos fertilizantes a base de biocarvão (BN). O número antes da barra representa a concentração de biocarvão (%) e o número após a barra representa a concentração de N no fertilizante.

Fonte: Adaptado de Puga et al. (2020b).

De acordo com os autores, o BC pode ser utilizado como carreador de nutrientes e pode resultar em liberação lenta e prolongada de nutrientes devido à sua elevada área de superfície e microestrutura porosa. Ademais, essas características podem reduzir perdas como lixiviação e aumentar a disponibilidade do nutriente, apresentando aumento de eficiência.

Em estudo em campo, Puga et al. (2020a) testaram alguns desses fertilizantes citados anteriormente e verificaram que os fertilizantes à base de BC com 10 e 17% de N e 51 e 40% de BC, respectivamente, proporcionaram ganhos de até 21% na produtividade do milho (Figura 3.3A) e de 12% na eficiência de uso do N pelas plantas (Figura 3.3.B). Segundo os autores, possivelmente esses resultados ocorreram em função da liberação mais lenta do N, possibilitando melhor aproveitamento pela cultura.



**Figura 3.7.** Produtividade do milho (kg ha<sup>-1</sup>) (a) e eficiência do uso de N (%) (b) em função da aplicação de ureia e dos fertilizantes nitrogenados à base de biocarvão (BN). O número antes da barra representa a concentração de biocarvão (%) e o número após a barra representa a concentração de N no fertilizante. Fonte: Adaptado de Puga et al. (2020a).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aproveitamento de resíduos na agricultura, principalmente como fertilizantes e/ou condicionadores do solo, é prática importante tanto sob o ponto de vista agrícola como ambiental. Entretanto, dificuldades tecnológicas, de logística e operacionais têm sido os maiores empecilhos para que a cadeia emergente de fertilizantes a partir de resíduos se estabeleça e seja consolidada.

Soluções discutidas e estabelecidas caso a caso têm maiores chances de sucesso, dadas as particularidades de cada resíduo e da região onde os mesmos são produzidos.

A disposição de lodo de esgoto é um desafio comum a todas as cidades e a produção de bio sólido de qualidade, juntamente com arranjos regionais para sua comercialização, podem viabilizar seu uso adequado, representando importante solução para a destinação do resíduo.

Por outro lado, soluções tecnológicas como a produção de organominerais a partir de biocarvão podem ser a diferença necessária para que o produto seja produzido e comercializado em grande escala.

Foram apresentados dois casos de sucesso, mas existem inúmeros outros com enorme potencial que ainda precisam explorados e desenvolvidos, beneficiando o ambiente e a agricultura brasileira.

## REFERÊNCIAS

- ABDELHAFEZ, A.A.; LI, J.; ABBAS, M.H.H. Feasibility of biochar manufactured from organic wastes on the stabilization of heavy metals in a metal smelter contaminated soil. **Chemosphere**, v. 117, p. 66-71, 2014.
- AGYARKO-MINTAH, E.; COWIE, A.; VAN ZWIETEN, L.; SINGH, B.P.; SMILLIE, R.; HARDEN, S.; FORNASIER, F. Biochar lowers ammonia emission and improves nitrogen retention in poultry litter composting. **Waste Management**, v. 61, p. 129-137, 2017.
- AHMAD, M.; RAJAPAKSHA, A.U.; LIM, J.E.; ZHANG, M.; BOLAN, N.; MOHAN, D.; VITHANAGE, M.; LEE, S.S.; OK, Y.S. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19-33, 2014.
- ALOVISI, A. M. T.; CASSOL, C. J.; NASCIMENTO, J. S.; SOARES, N. B.; JUNIOR, I. R. S.; SILVA, R. S.; SILVA, J. A. M. Soil factors affecting phosphorus adsorption in soils of Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 22, e00298, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00298>.
- ANDRADE, C.A.; BIBAR, M.P.S.; COSCIONE, A.R.; PIRES, A.M.M.; SOARES, A.G. Mineralização e efeitos de biocarvão de cama de frango sobre a capacidade de troca catiônica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 407-416, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000500008>.
- ANDRADE, C. A.; PUGA, A. P. Biocarvão: uso agrícola e ambiental. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. (org). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília: Embrapa, 2023. p. 435-473.
- ANDRADE, C. A.; SILVA, L. F. M.; PIRES, A. M. M.; COSCIONE, A. R. Mineralização do carbono e do nitrogênio no solo após sucessivas aplicações de lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 5, p. 536-544, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000500010>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004 resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2022**. São Paulo: ANDA, 2023.
- BASU, P. **Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory**. 2 ed. London: Academic Press, 2013. 548 p.
- BENITES, V. M.; TEIXEIRA, W. G.; PIMENTA, A. S.; RESENDE, M. E. Utilização de carvão e subprodutos da carbonização vegetal na agricultura: aprendendo com as terras pretas de índio. In: WENCESLAU, G.T.; KERN, D.C.; MADARI, B.E.; LIMA, H.N.; WOODS, W. (org). **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazonia Ocidental, 2009, p. 285-296.
- BENITES, V. M. et al. Produção de fertilizante organomineral granulado a partir de dejetos de suínos e aves no Brasil. In: Reunião Brasileira De Fertilidade Do Solo E Nutrição De Plantas, 29.; Reunião Brasileira Sobre Micorrizas, 13.; Simpósio Brasileiro De Microbiologia Do Solo, 11.; Reunião Brasileira De Biologia Do Solo, 8., 2010, Guarapari. Fontes de nutrientes e produção agrícola: modelando o futuro. Anais... Viçosa: SBCS, 2010

BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. **Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura**, Jaguariuna: Embrapa Meio Ambiente, 2006, 350 p.

BIBAR, M.P.S. **Potencial agrícola de biocarvões provenientes de biomassas alternativas**. 2014. 101 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Agrônômico de Campinas, Campinas.

BIEDERMAN, L.A.; HARPOLE, W.S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. **GCB-Bioenergy: Bioproducts for a Sustainable Bioeconomy**, v. 5, p. 202–214, 2013.

BLANCO-CANQUI, H. Biochar and soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, p. 687-711, 2017.

BOEIRA, R. C. Uso de lodo de esgoto como fertilizante orgânico: disponibilização de nitrogênio em solo tropical. Jaguariuna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. 3 p. (Embrapa Meio Ambiente. Comunicado Técnico, 12).

BORBA, R. P.; RIBEIRINHO, V. S.; CAMARGO, O. A.; ANDRADE, C. A.; KIRA, C. S.; COSCIONE, A. R. Ion leaching and soil solution acidification in a vadose zone under soil treated with sewage sludge for agriculture. **Chemosphere**, v. 192, p. 81-89, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.112>.

BORCHARD, N.; WOLF, A.; LABELHAFEZ AABS, V.; AECKERSBERG, R.; SCHERER, H.W.; MÖLLER, A.; AMELUNG, W. Physical activation of biochar and its meaning for soil fertility and nutrient leaching – a greenhouse experiment. **Soil Use Management**, v. 28, p. 177-184, 2012.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial**, seção 1, p. 3, 3 ago. 2010.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento. **Diário Oficial**, 16 jul. 2020a.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n.5, de 10 de março de 2016. Estabelece as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura. **Diário Oficial**, 14 mar. 2016. Disponível em: [https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393137/doi-2016-03-14-instrucao-normativa-n-5-de-10-de-marco-de-2016-21393106](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/21393137/doi-2016-03-14-instrucao-normativa-n-5-de-10-de-marco-de-2016-21393106). Acesso em: 01 set. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n. 35, de 04 de julho de 2006. Aprova as normas sobre especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos corretivos de acidez, de alcalinidade e de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura. **Diário Oficial**, n. 132, 12 jul. 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa SDA nº 25, de 23 de julho de 2009. **Diário Oficial**, 28 jul. 2009.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa SDA n. 27, de junho de 2006 (Alterada pela IN SDA nº 7, de 12/04/2016, republicada em 02/05/2016)**. Aprova os limites máximos de agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas

daninhas admitidos nos fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes destinados à agricultura. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-sda-27-de-05-06-2006-alterada-pela-in-sda-07-de-12-4-16-republicada-em-2-5-16.pdf>. Acesso em: 01 set. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa n. 61 de 8 de julho de 2020. Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. *Diário Oficial*, 15 jul. 2020b.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano nacional de resíduos sólidos**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2022. 209 p.

BRASIL. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos. **Plano nacional de fertilizantes 2050: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil**. Brasília: SAE, 2021. 195 p.

BUTNAN, S.; DEENIK, J.L.; TOOMSAN, B.; ANTAL, M.J.; VITYAKONA, P. Biochar characteristics and application rates affecting corn growth and properties of soils contrasting in texture and mineralogy. *Geoderma*, v. 237, p. 105-116, 2015.

CALVO BUENDÍA, E.; MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P. R. **Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. Genebra: IPCC, 2019. Genebra: IPCC, 2020. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM\\_Updated-Jan20.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_Updated-Jan20.pdf). Acesso em: 10 jan. 2022.

CAMARGO, O. A. de; PIRES, A. M. M.; BETTIOL, W. Lodo na agricultura. *Ciência Hoje*, v. 42, n. 248, p. 68-70, 2008.

CARNIER, R.; COSCIONE, A. R.; DELAQUA, D.; PUGA, A. P.; ABREU, C. A. Jack Bean development in multimetal contaminated soil amended with coffee waste-derived biochars. *Processes*, v. 10, 2157, 2022. <https://doi.org/10.3390/pr10102157>.

CARVALHO, C. S. **Matéria orgânica, agregação e proteção física em solos tratados com lodo de esgoto**. Campinas, 2015. 138 p. Tese (Doutorado) – Instituto Agrônomo (IAC), Campinas, 2015.

CARVALHO, C. S.; RIBEIRINHO, V. S.; ANDRADE, C. A.; GRUTZMACHER, P.; PIRES, A. M. M. Composição química da matéria orgânica de lodos de esgoto. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 10, n. 3, p. 413-419, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v10i3a5174>.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICAS. **Mapeamento de ações institucionais para sustentabilidade da produção de ferro-gusa a partir de carvão vegetal: subsídios para revisão do Plano Siderurgia**. Brasília: CGEE, 2015. 150 p.

CERRI, C.E.P.; ABBRUZZINI, T.F.; CARVALHO, J.L.N.; CHERUBIN, M.R.; FRAZÃO, L.A.; MAIA, S.M.F.; OLIVEIRA, D.M. Matéria orgânica do solo e o equilíbrio global de carbono. In: BETTIOL, W.; SILVA, C.A.; CERRI, C.E.P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C.A. (ed.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. p. 211-254.

CHOJNACKA, K. SKRZYPEZAK, D.; SZOPA, D. IZYDORECYK, G.; MOUSTAKAS, K.; WITEK-KROWIAK, A. Management of biological sewage sludge: Fertilizer nitrogen recovery as the solution to fertilizer crisis. *Journal of Environmental Management*, v. 326, 116602, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116602>.

CHUNXUE, Y., JOSEPH, S., LIANQING, L., GENXING, P., LIN, Y., MUNROE, P., PACE, B., TAHERYMOOSAVI, S., VAN ZWIETEN, L., THOMAS, T., NIELSEN, S., YE, J., DONNE, S., Developing more effective enhanced biochar fertilisers for improvement of pepper yield and quality. *Pedosphere*, v. 25, p. 703-712, 2015.

CLOUGH, T.; CONDRON, L.; KAMMANN, C.; MÜLLER, C. A review of biochar and soil nitrogen dynamics. *Agronomy*, v. 3, p. 275-293, 2013.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Tratamento de esgotos**. Disponível em: <https://www.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=49>. Acesso em: 20 jul. 2023.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n.498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de bioossólido em solos, e dá outras providências. *Diário Oficial*, ed. 161, seção 1, p. 265, 21 ago. 2020.

DALAHMEH, S. S.; THORSÉN, G.; JÖNSSON, H. Open-air storage with and without composting as post-treatment methods to degrade pharmaceutical residues in anaerobically digested and dewatered sewage sludge. *Science of the Total Environment*, v. 806, 151271, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151271>.

DOMINGUES, R. R. **Estabilidade da matéria orgânica e teores de metais pesados em solo tratado sucessivamente com lodo de esgoto**. Campinas, 2013. 108 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Agrônômico (IAC), Campinas.

DOMINGUES, R.R.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M.A.; SPOKAS, K.A.; MELO, L.C.A.; TRUGILHO, P.F.; VALENCIANO, M.N.; SILVA, C.A. Enhancing cation exchange capacity of weathered soils using biochar: feedstock, pyrolysis conditions and addition rate. *Agronomy*, v. 10, p. 1-17, 2020.

FALCÃO, N.P.S.; CLEMENT, C.R.; TSAI, S.M.; COMERFORD, N.B. Pedology, fertility, and biology of central Amazonian dark earths. In: WOODS, W.I.; TEIXEIRA, W.G.; LEHMANN, J.; STEINER, C.; WINKLERPRINS, A.; REBELLATO, L. (ed). *Amazonian dark earths: Wim Sombroek's vision*. Berlin: Springer Science, 2009. p. 213-228.

GONÇALVES, C. A.; CAMARGO, R.; SOUZA, R. T. X.; SOARES, N. S.; OLIVEIRA, R. C.; STANGER, M. C.; LANA, R. M. Q.; LEMES, E. M. Chemical and technological attributes of sugarcane as functions of organomineral fertilizer based on filter cake or sewage sludge as organic matter sources. *PLOS ONE*, v. 16, n. 2, e0236852, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236852>.

GRABER, E.R.; ELAD, Y. Biochar impact on plant resistance to disease. In: LADYGINA, N.; RINEAU, F. (ed.). *Biochar and soil biota*. Boca Raton: CRC Press, 2013. p. 41-68.

GRUTZMACHER, P. **Estoques de carbono no solo e emissão de gases de efeito estufa em sistema de produção de milho com uso de lodo de esgoto**. Campinas, 2016. 120 f. Tese (Doutorado) – Instituto Agrônômico (IAC), Campinas.

GRUTZMACHER, P.; PUGA, A.P.; BIBAR, M.P.S.; COSCIONE, A.R.; PACKER, A.P.; ANDRADE, C.A. Carbon stability and fertilizer induced  $N_2O$  emissions mitigation in soil treated with biochar. *Science of the Total Environment*, v. 625, p. 1459-1466, 2018.

GUIMARÃES, R. N.; MATOS, A. T.; CARPANEZ, T. G. Alterações químicas e sanitárias em solos e estéril de mineração receptores de lodo de esgoto, composto orgânico e fertilizante mineral. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 27, n. 4, p. 783-793, 2022.

INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE. **Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil**. Version: 2.1. IBI-STD-01.1, 23 nov. 2015. Disponível em: [https://www.biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI\\_Biochar\\_Standards\\_V2.1\\_Final.pdf](https://www.biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final.pdf). Acesso em: 02 fev. 2021.

JAISSWAL, A.K.; ELAD, Y.; GRABER, E.R.; FRENKEL, O. Rhizoctonia solani suppression and plant growth promotion in cucumber as affected by biochar pyrolysis temperature, feedstock and concentration. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 69, p. 110-118, 2014.

JANCZAK, D.; MALINSKA, K.; CZEKAŁA, W.; CÁCERES, R.; LEWICKI, A.; DACH, J. Biochar to reduce ammonia emissions in gaseous and liquid phase during composting of poultry manure with wheat straw. *Waste Management*, v. 66, p. 36-45, 2017.

JOSEPH, S.; GRABER, E. R.; CHIA, C.; MUNROE, P.; DONNE, S.; THOMAS, T.; NIELSEN, S.; MARJO, C.; RUTLIDGE, H.; PAN, G.X.; LI, L.; TAYLOR, P.; RAWAL, A.; HOOK, J. Shifting paradigms: development of high-efficiency biochar fertilizers based on nano-structures and soluble components. *Carbon Management*, v. 4, p. 323-343, 2013.

KERN, D.C.; KAMPF, N.; WOODS, W.I.; DENEVAN, W.M.; COSTA, M.L.; FRAZÃO, F.J.L.; SOMBROEK, W. Evolução do conhecimento em terra preta de índio. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D.C.; MADARI, B.E.; LIMA, H.N.; WOODS, W. (ed.). *As terras pretas de índio na Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas*. Manaus: Embrapa Amazônica Ocidental, 2009. p. 72-81.

KOMINKO, H.; GORAZDA, K.; WZOREK, Z. Formulation and evaluation of organo-mineral fertilizers based on sewage sludge optimized for maize and sunflower crops. *Waste Management*, v. 136, p. 57-66, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.09.040>.

KRAHEMBUHL, C. B. B. P. **Emissão de gases de efeito estufa na disposição final de lodo de esgoto**. Campinas, 2021. 78 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Agronômico (IAC), Campinas, 2021.

LAL, R. Biochar and soil carbon sequestration. In: GUO, M.; HE, Z.; UCHIMIYA, S.M. *Agricultural and environmental applications of biochar: advances and barriers*. Madison: SSSA, 2016. p. 175-197.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for environmental management: science and technology and implementation**. London & Sterling, VA: Earthscan, 2009. 416 p.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. Biochar for environmental management: an introduction. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. London & Sterling, VA: Earthscan, 2015. p. 1-13.

LUCON, I. M. **Biocarvão nos atributos físicos, químicos e produtividade do milho em solo sob clima tropical**. 2019. 105 p. Tese (Doutorado) – Instituto Agronômico (IAC), Campinas, 2019.

MANZONI, L.P.; BARROS, T.D. **Carvão vegetal**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT0oogc6fompl02wx5ok0idx9l-c67w6200.html>. Acesso: 22 junho 2015.

MARTINS, D. R.; CAMARGO, O. A.; RIBEIRINHO, V. S.; ANDRADE, C. A. Estado nutricional de cafeeiros comerciais após a aplicações de lodo de esgoto como condicionador de solo. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 58, n. 3, p. 248-256, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2019>.

MELO, L.C.A.; COSCIONE, A.R.; ABREU, C.A.; PUGA, A.P.; CAMARGO, O.A. Influence of pyrolysis temperature on cadmium and zinc sorption capacity of sugar cane straw derived biochar. **Bioresources**, v. 8, p. 4992-5002, 2013.

MINX, J. C.; LAMB, W. F.; CALLAGHAN, M. W.; FUSS, S.; HILAIRE, J.; CREUTZIG, F.; AMANN, T.; BERINGER, T.; OLIVEIRA GARCIA, W. de; HARTMANN, J.; KHANNA, T.; LENZI, D.; LUDERER, G.; NEMET, G. F.; ROGELJ, J.; SMITH, P.; VICENTE, J. L.; WILCOX, J.; ZAMORA DOMINGUEZ, M. del. Negative emissions – part 1: research landscape and synthesis. **Environmental Research Letters**, v. 13, p. 063001, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabf9b>.

MOSQUERA-LOSADA, R.; AMADOR-GARCÍA, A.; MUÑOZ-FERREIRO, N.; SANTIAGO-FREIJANE, J. J.; FERREIRO-DOMÍNGUEZ, N.; ROMERO-FRANCO, R.; RÍGUEIRO-RODRÍGUEZ, A. Sustainable use of sewage sludge in acid soils within a circular economy perspective. **Catena**, v. 149, p. 341-348, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.10.007>.

NASCIMENTO, A. L.; SOUZA, A. J.; OLIVEIRA, F. C.; COSCIONE, A. R.; VIANA, D. G.; REGITANO, J. B. Chemical attributes of sewage sludges: Relationships to sources and treatments, and implications for sludge usage in agriculture. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, 120746, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120746>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. **Rumo a uma economia verde caminhos para o desenvolvimento sustentável e a erradicação da pobreza – Síntese para tomadores de decisão**. Brasília, DF: PNUMA, 2011. 52 p. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/rumo-uma-economia-verde-caminhos-para-o-desenvolvimento-sustentavel-e-erradicacao>. Acesso em: 15 ago. 2023.

PARK, J.H., CHOPPALA, G.K., BOLAN, N.S., CHUNG, J.W., CHUASAVATHI, T. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. **Plant Soil**, v. 48, p. 439-451, 2011.

PAZ-FERREIRO, J., LU, H., FU, S., MÉNDEZ, A.; GASCÓ, G. Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: a review. **Solid Earth**, 5, 65-75, 2014.

PIRES, A. M. M.; ANDRADE, C. A. **Recomendação de dose de lodo de esgoto: a questão do nitrogênio**. Jaguariúna: EMBRAPA, 2014. 8 p. Comunicado Técnico 52.

PIRES, A. M. M.; ANDRADE, C. A.; SOUZA, N. A. P.; CARMO, J. B.; COSCIONE, A. R.; CARVALHO, C. S. Disponibilidade e mineralização do nitrogênio após aplicações sucessivas de lodo de esgoto no solo, estimadas por meio de incubação anaeróbica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 4, p. 333-342, 2015.

PITOMBO, L. M. **Estoques de carbono e nitrogênio e fluxos de gases do efeito estufa em solo com diferentes históricos de aplicação de lodo de esgoto.** 2011. 61 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico, Campinas, 2011.

PROENÇA, L. C.; RODRIGUES, C. A. O.; LANA, M. M. **Compostagem.** Brasília, DF: Embrapa, out. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/hortalica-nao-e-so-salada/secoes/compostagem>. Acesso em: 26 de julho de 2023.

PROTÁSIO, T.P.; TRUGILHO, P.F.; MIRMEHDI, S.; SILVA, M.G. Quality and energetic evaluation of the charcoal made of babassu nut residues used in the steel industry. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 38, p. 435-444, 2014.

PUGA, A.P.; ABREU, C.A.; MELO, L.C.A.; BEESLEY, L. Biochar application to a contaminated soil reduces the availability and plant uptake of zinc, lead and cadmium. *Journal of Environmental Management*, v. 159, p. 86-93, 2015.

PUGA, A.P.; GRUTZMACHER, P.; CERRI, C.E.P.; RIBEIRINHO, V.S.; ANDRADE, C.A. Biochar-based nitrogen fertilizers: Greenhouse gas emissions, use efficiency, and maize yield in tropical soils. *Science of the Total Environment*, v. 704, p. 1-10, 2020a.

PUGA, A.P.; QUEIROZ, M.C.A.; LIGO, M.A.V.; CARVALHO, C.S.; PIRES, A.M.M.; MARCATTO, J.O.S.; ANDRADE, C.A. Nitrogen availability and ammonia volatilization in biochar-based fertilizers. *Archives of Agronomy and Soil Science*, v. 66, p. 992-1004, 2020b.

RIBEIRINHO, V. S. **Metais Pesados e matéria orgânica do solo anos após a última aplicação de lodo de esgoto.** Campinas, 2015. 136 f. Tese (Doutorado) – Instituto Agronômico (IAC), Campinas.

RODRIGUES, M. M.; VIANA, D. G.; OLIVEIRA, F. C.; ALVES, M. C.; REGITANO, J. B. Sewagesludge as organicmatrix in the manufacture of organomineral fertilizers: Physicalforms, environmental risks, and nutrients recycling. *Journal of Cleaner Production*, v. 313, 127774, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127774>.

SANCHEZ-MONEDERO, M.A.; CAYUELA, M.L.; ROIG, A.; JINDO, K.; MONDINI, C.; BOLAN, N. Role ofbiochar as na aditive in organicwastecomposting. *Bioresource Technology*, v. 247, p. 1155-1164, 2018.

SHARKAWI, H.M.E., TOJO, S., CHOSA, T., MALHAT, F.M., YOUSSEF, A.M. Biochar ammonium phosphate as an uncoated-slow release fertilizer in sandy soil. *Biomass Bioenergy*, v. 117, p. 154-160, 2018.

SILVA, C.A.; CERRI, C.E.P.; ANDRADE, C.A.; MARTIN-NETO, L.; BETTIOL, W. Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções. In: BETTIOL, W.; SILVA, C.A.; CERRI, C.E.P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C.A. (ed.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical.** Brasília, DF: Embrapa, 2022. p. 17-47.

SILVA, L. G.; ANDRADE, C. A.; BETTIOL, W. Biochar amendment increases soil microbial biomass and plant growth and suppresses fusarium wilt in tomato. *Tropical Plant Pathology*, v. 45, p. 73-83, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40858-020-00332-1>

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS. **Resíduos dos serviços de saneamento básico.** Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-dos-servicos-de-saneamento-basico/>. Acesso em: 20 de julho de 2023.

SOHI, S.P. Carbon storage with benefits. *Science*, v. 338, p. 1034-1035, 2012.

SPOKAS, K.A.; CANTRELL, K.B.; NOVAK, J.M.; ARCHER, D.W.; IPPOLITO, J.A.; COLLINS, H.P.; BOATENG, A.A.; LIMA, I.M.; LAMB, M.C.; MCALOON, A.J.; LENTZ, R.D.; NICHOLS, K.A. Biochar: asynthesisof its agronomic impact beyond carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality*, v. 41, p. 973-989, 2012a.

STEINER, C.; DAS, K.C.; MELEAR, N.; LAKLY, D. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar. *Journal of Environmental Quality*, v. 39, p. 1236-1242, 2010.

TAN, C.; YAXIN, Z.; HONGTAO, W.; WENJING, L.; ZEYU, Z.; YUANCHENG, Z.; LULU, R. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and heavy metal adsorptive performance of biochar derived from municipal sewage sludge. *Bioresource Technology*, v. 164, p. 47-54, 2014.

TIAN, R.; LI, C.; XIE, S.; YOU, F.; CAO, Z.; XU, Z.; YU, G.; WANG, Y. Preparation of biochar via pyrolysis at laboratory and pilot scales to remove antibiotics and immobilize heavy metals in livestock feces. *Journal of Soils and Sediments*, v. 19, p. 2891-2902, 2019.

TOZZI, F.V.N.; COSCIONE, A.R.; PUGA, A.P.; CARVALHO, C.S.; CERRI, C.E.P.; ANDRADE, C.A. Carbon stability and biochar aging process after soil application. *Horticulture International Journal*, v. 3, p. 320-329, 2019.

UCHIMIYA, M.; CHANG, S.; KLASSON, K.T. Screening biochars for heavy metal retention in soil: Role of oxygen functional groups. *Journal of Hazardous Materials*, v. 190, p. 432-441, 2011.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *A guide to the biosolids risk assessments for the EPA Part 503 rule, 1995*. Washington: USEPA; Office of Wastewater Management, 1995. 195 p. EPA/832-B-93-005.

VERDE, S.F.; CHIARAMONTI, D. *The biochar system in the EU: the pieces are falling into place, but key policy questions remain*. Florence: EuropeanUniversityInstitute, 2021. 10 f. (Robert Schuman CentreandAdvancedStudies, PolicyBrief, n. 2021/08, Feb. 2021).

VIEIRA R. F. Sewage sludge effects on soybean growth and nitrogen fixation. *Biology and Fertility of Soils*, v. 34, p. 196-200, 2001.

VIEIRA, R. F.; CARDOSO, A. A. Variações nos teores de nitrogênio mineral em solo suplementado com iodo de esgoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 38, n. 7, p. 867-874, 2003.

VIEIRA, R. F.; MORICONI, W.; PAZIANOTTO, R. A. A. Residual and cumulative effects of soil application of sewage sludge on corn productivity. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 21, p. 6472-6481, 2014.

VIEIRA, R. F.; PAZIANOTTO, A. A. Microbial activities in soil cultivated with corn and amended with sewage sludge. *SpringPlus*, v. 5, article 1844, 2016.

VIEIRA, R. F.; SILVA, C. M. M. S. Soil amendment with sewage sludge and its impact on soil microflora. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 34, p. 56-58, 2003.

- VIEIRA, R. F.; TANAKA, R. T.; SILVA, C. M. M. S. **Utilização de lodo de esgoto na cultura de soja**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. 26 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 21).
- VIEIRA, R. F.; TSAI, S. M.; TEIXEIRA, M. A. Nodulação e fixação simbiótica de nitrogênio em feijoeiro com estirpes nativas de rizóbio, em solo tratado com lodo de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 10, p. 1047-1050, 2005.
- WANG, J.; XIONG, Z.; KUZYAKOV, Y. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. **GCB Bioenergy**, v. 8, p. 512-523, 2016.
- WEBSTER, K. **The circular economy: a wealth of flows**. Isle of Wight: Ellen MacArthur Foundation, 2015. 210 p.
- WEN, P., WU, Z., HAN, Y., CRAVOTTO, G., WANG, J., YE, B.C. Microwave-assisted synthesis of a novel biochar-based slow-release nitrogen fertilizer with enhanced water-retention capacity. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 5, p. 7374-7382, 2017.
- YOSHIDA, H.; HOEVE, M. T.; CHRISTENSEN, T. H.; BRUUN, S.; JENSEN, L. S.; SCHEUTZ, C. Life cycle assessment of sewage sludge management options including long-term impacts after land application. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 538-547, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.175>.
- ZARONI, M. J.; SANTOS, H. G. **Solos tropicais: formação do solo tropical**. Brasília, DF: Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 09 dez. 2021. (Solos Tropicais). Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/formacao-do-solo-tropical>. Acesso em: 16 ago. 2023.
- ZHENG, J., HAN, J., LIU, Z., XIA, W., ZHANG, X., LI, L., LIU, X., BIAN, R., CHENG, K., ZHENG, J., PAN, G. Biochar compound fertilizer increases nitrogen productivity and economic benefits but decreases carbon emission of maize production. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 241, p. 70-78, 2017.
- ZHOU, Z., DU, C., LI, T., SHEN, Y., ZENG, Y., DU, J., ZHOU, J. Biodegradation of a biochar-modified waterborne polyacrylate membrane coating for controlled-release fertilizer and its effects on soil bacterial Community profiles. **Environmental Science Pollution Research**, v. 22, p. 8672-8682, 2015.

# CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA AO DESENVOLVIMENTO E ADOÇÃO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS AGROECOLÓGICOS

*Luiz Octávio Ramos Filho, Francisco Miguel Corrales, Jeanne Sacardini Marinho-Prado, João Carlos Canuto, Joel Leandro de Queiroga, Kátia Sampaio Malagodi-Braga, Marcos Corrêa Neves, Mário Artemio Urchei, Myrian Suely Teixeira Alves dos Santos Ramos, Ricardo Costa Rodrigues de Camargo e Waldemore Moriconi*

## INTRODUÇÃO

Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) têm se destacado como uma das estratégias mais promissoras para melhorar e estabilizar os meios de subsistência no campo, reduzir a pressão sobre áreas protegidas, melhorar o habitat de espécies silvestres e aumentar a conectividade dos componentes da paisagem (Ashley et al., 2006; Bhagwat et al., 2008). Enquanto estratégia produtiva, é crescente o número de experiências de SAFs praticadas por agricultores em várias regiões do Brasil. No estado de São Paulo, o interesse por esse tipo de sistema biodiverso também tem crescido de forma expressiva nas duas últimas décadas.

Nesse sentido, desde 2004, a equipe da Embrapa Meio Ambiente, junto a parceiros(as) de instituições públicas de pesquisa, ensino e extensão e do setor produtivo, vem desenvolvendo em campo projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) voltados para a agricultura familiar, com sistemas produtivos biodiversos de ciclo longo, com ênfase nos SAFs. Por meio desses projetos, a equipe, colaboradores(es) e parceiros(as), vêm buscando obter resultados que contribuam para consolidar esses sistemas e para legitimar os programas que fomentam a sua adoção, particularmente, na agricultura familiar.

Neste capítulo, busca-se relatar brevemente as principais ações realizadas pela equipe de 2004 a 2021, destacando alguns aspectos metodológicos e resultados alcançados, abordando alguns grandes eixos: as premissas metodológicas da pesquisa participativa; certos desenhos e soluções técnicas desenvolvidas; as atividades de apoio à adoção de SAFs em alguns territórios de agricultura familiar; os principais resultados de pesquisa

sobre aspectos ambientais e socioeconômicos dos SAFs; as contribuições à legislação e políticas públicas; as ações de capacitação participativa em SAFs; e os estudos e contribuições a processos de comercialização e agregação de valor dos produtos agroflorestais.

Para efeito de melhor contextualização, o capítulo inicia-se com uma conceituação do tipo de SAF que a equipe vem trabalhando, seguida de um breve histórico da atuação da equipe, mostrando a trajetória dos trabalhos e projetos desenvolvidos nesse período.

## CONCEITUAÇÃO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS AGROECOLÓGICOS E BIODIVERSOS

Os SAFs agroecológicos e biodiversos, também conhecidos como agroflorestas, são sistemas produtivos que combinam culturas agrícolas com árvores florestais e frutíferas na mesma área, buscando uma utilização mais eficiente de recursos naturais como solo, água e energia. Ainda que não se possa falar em um “modelo fechado”, visto que podem existir variações de espaçamento e composição de espécies conforme as condições edafoclimáticas e socioeconômicas de cada contexto específico, as características básicas que definem os SAFs agroecológicos nos quais a equipe tem trabalhado nos últimos anos seguem alguns princípios comuns, como: 1) o incremento da biodiversidade; 2) a proteção e cobertura do solo; 3) o não uso de agrotóxicos; e 4) as estratégias de manejo de base ecológica, alicerçadas no uso de insumos orgânicos e na dinamização de processos internos que favorecem a ciclagem de nutrientes. Outras características são a produção e o acúmulo de biomassa (matéria orgânica) para a melhoria progressiva da saúde do solo e maior equilíbrio fitossanitário baseado no incremento de biodiversidade; a promoção de uma dinâmica de estágios sucessionais e de uma estrutura multiestratificada, simulando a sucessão ecológica que caracteriza a formação de florestas tropicais; o uso de entrelinhas mais abertas, facilitando a mecanização e impedindo um sombreamento precoce da área destinada à produção de cultivos anuais e hortaliças, necessários para garantir a rentabilidade econômica do sistema nos primeiros anos; a realização periódica de podas e a exploração de espécies econômicas de curto prazo (hortaliças, culturas anuais), médio prazo (banana, abacaxi etc.) e longo prazo (café, palmitos, árvores frutíferas e madeireiras). Devido à alta biodiversidade, também é possível incrementar a renda do agricultor integrado a criação de abelhas-sem-ferrão (*Meliponini*) ao SAF, bem como outras criações animais.

Nas etapas iniciais do sistema, busca-se usar espécies de rápido crescimento e alta produção de biomassa, como árvores pioneiras, gramíneas, adubos verdes herbáceos e arbustivos, a fim de promover uma rápida cobertura do solo e alimentar as plantas de ciclo mais longo, acumulando matéria orgânica como cobertura morta nas linhas

das espécies econômicas de médio e longo prazo. Essa técnica, além de proteger o solo da erosão, melhora a vida e a microbiota do solo, diminui a necessidade de capinas e preserva mais a umidade para as plantas.

Por meio do aumento da matéria orgânica, da proteção do solo, da ciclagem de nutrientes pelas árvores, da alta biodiversidade e da não contaminação do meio ambiente por agrotóxicos, essa tecnologia busca um uso mais sustentável dos recursos naturais, menor dependência de insumos externos, maior equilíbrio ecológico entre pragas e inimigos naturais e, conseqüentemente, a produção de alimentos mais saudáveis para o agricultor e consumidores. Essa tecnologia também possibilita diversos serviços ecossistêmicos, como conservação e melhoria do solo, sequestro de carbono, abrigo e sustento para a fauna, proteção dos recursos hídricos e melhor infiltração das águas de chuva. Ela permite, assim, conciliar a produção econômica de alimentos, madeira e fibras com a preservação ambiental. Para o agricultor e sua família, essa tecnologia pode apresentar diversos benefícios, que incluem produção mais diversificada, maior resiliência às flutuações do mercado, melhores condições de trabalho, melhoria na segurança alimentar, menores custos de produção e maior estabilidade frente às mudanças climáticas.

Dentro do conceito mais amplo de SAFs, pode estar incluída uma enorme diversidade de arranjos, sistemas e técnicas de manejo, variando dos mais simples aos mais complexos. Quanto a essa diversidade, cabe destacar alguns aspectos comuns e de caráter mais geral, baseados nas observações acumuladas no histórico de trabalho da equipe acerca do tema, que permitem partir da premissa de que os SAFs biodiversos e agroecológicos voltados para a agricultura familiar constituem um conhecimento inovador e complexo, originam-se de um processo de construção do conhecimento acumulativo e de longo prazo e demandam a construção participativa e endógena (local).

Portanto, essa tecnologia apresenta forte dependência de arranjos socioeconômicos e culturais locais para sua continuidade, consolidação e desenvolvimento.

## TRAJETÓRIA DA ATUAÇÃO DA EMBRAPA MEIO AMBIENTE COM SISTEMAS AGROFLORESTAIS

No estado de São Paulo, a Embrapa Meio Ambiente tem desenvolvido, desde 2004, diversas ações de PD&I com agricultores familiares na temática de sistemas agroecológicos biodiversos, com destaque para os SAFs. Essas ações abarcam diversas regiões do estado e a própria sede da Embrapa Meio Ambiente, em Jaguariúna (Urchei, Canuto, 2017).

Trabalhos mais sistemáticos com SAFs tiveram início no período de 2004 a 2007, quando foi executado o projeto Sistematização e avaliação de experiências do uso de

SAFs para recomposição de reserva legal e áreas de preservação permanente: estudos de caso em assentamentos rurais no estado de São Paulo. Esse projeto permitiu um primeiro mapeamento sobre as principais experiências com SAFs no estado, sistematizando 15 núcleos irradiadores e possibilitando identificar as principais vertentes de concepções e modelos praticadas na época. Todavia, constatou-se que, em geral, eram experiências localizadas e relativamente incipientes, ainda que promissoras. Outra constatação foi que a maior parte das experiências era desenvolvida por agricultores familiares e organizações não governamentais (ONGs), havendo pouca interação com as instituições de pesquisa e órgãos ambientais. Desse modo, ao aproximar esses diferentes atores, um dos principais resultados do projeto foi a oferta de subsídios técnico-científicos que impulsionaram a criação de uma normativa estadual para regulamentar o uso de SAFs em áreas protegidas e/ou de uso livre (Resolução SMA-SP nº 44/2008).

Paralelamente, a equipe de agroecologia da Embrapa Meio Ambiente desenvolveu nesse mesmo período o projeto Capacitação socioambiental em assentamentos rurais (Edital MDA/MCT/Embrapa - 2004), o qual teve os SAFs como um de seus eixos centrais, resultando na implantação de duas Unidades de Observação Participativa (UOPs) em dois assentamentos rurais do estado de São Paulo, nas regiões de Ribeirão Preto e Itapeva (SOUZA et al., 2010). Essas iniciativas estimularam pelo menos dez agricultores familiares do Assentamento Sepé Tiaraju (região de Ribeirão Preto) a implantarem parcelas de SAFs em seus lotes (Ramos-Filho, 2013).

Durante os anos de 2009 a 2011, a equipe buscou acompanhar o desenvolvimento dessas experiências a partir do monitoramento dos SAFs implantados pelos agricultores, focando a análise de aspectos ambientais e ecológicos (Queiroga et al., 2013). No período de 2010 a 2012, foram abertas outras frentes para a implantação de novos SAFs: a primeira na região de Franca, SP, por meio de projeto financiado por emenda parlamentar, que permitiu o desenvolvimento de novos modelos de SAFs (Galvão et al., 2011); e a segunda em área experimental da Embrapa Meio Ambiente (Sítio Agroecológico, em Jaguariúna, SP), onde, desde o final de 2009, foram implantados diversos modelos de SAFs, inspirados nas experiências dos agricultores, permitindo o monitoramento mais sistemático de alguns indicadores ambientais e econômicos (Neves et al., 2014).

Visando suprir a lacuna de análises econômicas, em 2015, foi iniciado o projeto Monitoramento e avaliação econômica de SAFs agroecológicos: estudos de caso no estado de São Paulo, que permitiu obter indicadores de projeção da viabilidade econômico-financeira dos SAFs estudados e, principalmente, identificar os subprocessos prioritários a serem trabalhados para otimizar o rendimento do sistema (Ramos-Filho et al., 2017). No mesmo período, foi dado forte apoio técnico à Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA-SP), tanto no acompanhamento e implantação de SAFs do Programa Estadual de Desenvolvimento Rural (PDRS)

Microbacias II (Peruchi et al., 2015; Camargo et al., 2018), que fomentou a implantação de 600 ha de SAFs, quanto no aporte técnico e metodológico a um grupo de trabalho (Painel SAF) criado via portaria da SMA para o monitoramento dos projetos e aperfeiçoamento das políticas públicas de fomento à adoção de SAFs no estado.

Outra ação em parceria que permitiu a ampliação do número de SAFs implantados com apoio técnico da Embrapa Meio Ambiente foi o projeto Ecoforte – Rede de Agroecologia Leste Paulista – Alta Mogiana (2015–2017), aprovado no âmbito do Edital de Seleção Pública nº 2014/005 –, Redes Ecoforte de Projetos de Redes de Agroecologia, Extrativismo e Produção Orgânica. Coordenado pela Associação de Agricultura Natural de Campinas (ANC) e financiado pela Fundação Banco do Brasil (FBB) e pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), volta-se para o fortalecimento da Rede de Agroecologia Leste Paulista – Alta Mogiana, envolvendo a implantação de Unidades de Referência (URs) de SAF em Serrana, Americana, Restinga e Jaguariúna, no Sítio Agroecológico da Embrapa Meio Ambiente.

Mais recentemente, de 2016 a 2019, a equipe da Embrapa Meio Ambiente coordenou o projeto Sistematização participativa de experiências e intercâmbio de conhecimentos em SAFs voltados à agricultura familiar em regiões da Mata Atlântica no sul e sudeste do Brasil (Seisaf). Executado em parceria com outras unidades da Embrapa (situadas no Rio de Janeiro, Paraná e Rio Grande do Sul), esse projeto buscou mapear e sistematizar experiências de SAFs nos quatro estados, diagnosticando os principais gargalos para o avanço dos sistemas e identificando, junto aos agricultores, potenciais soluções para superação desses gargalos (Queiroga et al., 2018).

A partir dessa trajetória, envolvendo uma ampla rede de parceiros (agricultores, ONGs, órgãos públicos de pesquisa e extensão, gestores de políticas públicas) e com base no acúmulo obtido em mais de uma década de trabalhos com o complexo tema dos SAFs, foi iniciado em 2019 um novo projeto, denominado Consolidação e otimização produtiva, ambiental e econômica de um desenho básico de SAF agroecológico para regiões de floresta estacional no estado de São Paulo (OtimizaSAF). Esse novo projeto visa o desenvolvimento de soluções de inovação, de caráter incremental, que otimizem subprocessos importantes identificados em projetos anteriores, como o manejo mais eficiente da biomassa, a potencialização da biodiversidade de insetos para controle biológico e polinização e o uso eficiente da água. Já em 2021, iniciou-se o projeto Integração da criação racional de abelhas-sem-ferrão e da conservação de polinizadores à multifuncionalidade dos Sistemas Agroflorestais agroecológicos e biodiversos (IntegrASF-SAF), visando desenvolver, com agricultores familiares e técnicos, um sistema de produção integrado entre a meliponicultura e os SAFs, que potencializasse os benefícios da multifuncionalidade desses sistemas de produção, gerando novas oportunidades para a superação dos desafios socioeconômicos e ambientais na agricultura familiar.

As comunidades rurais com que se tem trabalhado formam uma rede de inúmeras experiências orientadas pela perspectiva da construção participativa do conhecimento agroecológico, em especial com agricultores familiares não consolidados economicamente, em situação de vulnerabilidade socioeconômica e em assentamentos de reforma agrária. O cerne da metodologia utilizada está nos métodos participativos de construção do conhecimento agroecológico, principalmente na experimentação participativa, na troca de conhecimentos entre camponês e camponês, no uso de UOPs e URs<sup>1</sup> e na articulação de redes regionais de agroecologia (Canuto et al, 2014).

## CONSTRUÇÃO PARTICIPATIVA DO CONHECIMENTO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS AGROECOLÓGICOS

As premissas clássicas da chamada “difusão de tecnologia”, consolidadas pelas instituições ao longo da modernização conservadora da agricultura, afirmam que existem dois polos nesse processo. O primeiro é o técnico, o polo emissor de conhecimentos; e o segundo é o receptor, o agricultor. A partir deles se daria um processo de transferência de tecnologias entre quem detém o conhecimento e quem não o detém e é instado a adotá-lo. Essa abordagem difusionista pressupõe que o agricultor é um passivo receptor, sem saber ou identidade, perspectiva já criticada por Paulo Freire, em 1969, em sua obra *Extensão ou comunicação?* As abordagens participativas invertem tal lógica, reconhecendo o papel protagonista dos agricultores na construção do conhecimento. Nesse sentido, a equipe de Agroecologia da Embrapa Meio Ambiente tem procurado reconhecer o saber dos agricultores e trazer novas ideias para que, juntos, pesquisadores e agricultores possam promover a construção do conhecimento agroecológico com base nas condições locais.

A forma concreta que traduz tais premissas são as chamadas URs, como estratégia de ação nas comunidades para o trabalho de planejamento, desenho, implantação, manejo e irradiação do conhecimento agroecológico. As URs são propriedades ou parcelas em que são exercidas as metodologias participativas, nas quais interagem técnicos e agricultores, de modo a construir sistemas sustentáveis de produção adequados às condições ecológicas e econômicas reais dos agricultores. Elas levam em conta os objetivos de vida dos agricultores, mas também condições materiais, como

---

<sup>1</sup> O termo Unidade de Referência é o mais utilizado na literatura, representando o conceito mais geral. Na Embrapa, são adotadas algumas nomenclaturas específicas, entre elas a de Unidade de observação (UO), designando espaços ou parcelas em campo que permitem a observação/validação de resultados gerados pela Embrapa e parceiros, na sua fase de avaliação, em diferentes ambientes e épocas. Em alguns casos, a equipe costuma utilizar o termo Unidade de observação participativa (UOP), buscando enfatizar um dos princípios fundamentais da agroecologia: a construção participativa do conhecimento.

as do solo, água, biodiversidade, conhecimento anterior, disponibilidade financeira, entre outras dimensões.

Nas URs, não se busca apenas “transferir” conhecimentos, mas sim construí-los através do diálogo entre os saberes dos técnicos e agricultores. Por isso, não se separa a geração do conhecimento da sua apropriação social, buscando sintetizar as diversas funções de experimentação, adaptação, validação, aplicação, disseminação e apropriação dos conhecimentos pela comunidade. As URs têm sido uma forma prática de aplicação da metodologia “camponês-a-camponês”, já consagrada pelos movimentos sociais como mais adequada e eficiente que a velha difusão de tecnologia.

No caso da atuação da equipe de Agroecologia, tem sido exercida uma estratégia que vai mais além, fundindo a metodologia camponês-a-camponês à experiência de pesquisa institucional no âmbito do Sítio Agroecológico, localizado no Campo Experimental da Embrapa Meio Ambiente, onde foram implantados diversos formatos de agrofloresta. Nessa área experimental, pôde-se criar arranjos agroflorestais e estudá-los com mais profundidade, gerando parâmetros que podem ser, com mais segurança, aplicados aos sistemas produtivos dos agricultores. Essa formulação, em que as experiências do Sítio Agroecológico e das URs nos campos dos agricultores mantém um espaço de diálogo, é inovadora e tem grandes perspectivas de consolidar-se como forma avançada de construção de conhecimento agroecológico.

Com base nessas premissas, no decorrer desses 17 anos, ocorreu uma intensa agenda de atividades de geração e intercâmbio de conhecimentos realizadas sob a coordenação da Embrapa Meio Ambiente e instituições parceiras. Tendo por propósito promover o diálogo de saberes entre agricultores(as) familiares, estudantes, profissionais do ensino superior, da pesquisa agropecuária e da extensão rural, as ações específicas de capacitação nas múltiplas temáticas relacionadas a SAFs observaram estreita relação com os conceitos, princípios e métodos fundamentados na Agroecologia.

Dentre os referenciais teórico-metodológicos que orientaram o planejamento e a realização das ações de intercâmbio de conhecimentos, destacam-se a pedagogia da autonomia (Freire, 1983), a lógica dos agricultores-experimentadores (Hocdé, 1999), a dimensão da pesquisa-ação (Thiollent, 2008) e a teoria do ator-rede (Schmitt, 2011), que orientaram a trajetória percorrida nos processos de capacitação em SAFs adotados pela equipe da Embrapa Meio Ambiente. Nessas abordagens, há o entendimento da necessidade do diálogo entre saberes populares e acadêmico-científicos, para que esse processo venha a ser promotor da construção de conhecimentos vinculados a problemas percebidos como prioritários pelas comunidades rurais. A partir dessa problematização e da formação de redes sociotécnicas colaborativas, foram utilizados métodos participativos que permitissem atender às principais necessidades identificadas na temática dos SAFs biodiversos em relação aos seus aspectos ambientais, econômicos e sociais peculiares às dinâmicas locais.

Para viabilizar a aplicabilidade desses referenciais, foram adotados procedimentos que possibilitaram realizar ações integradas de pesquisa e aprendizado ou, na concepção agroecológica, de construção e socialização de conhecimentos. Entre os principais procedimentos adotados nessas práticas, utilizaram-se parcelas de campo em estabelecimentos rurais de referência (Gastal, 1997; Souza et al., 2000) no formato de redes de URs, que incluíram as parcelas do campo experimental da Embrapa (UOPs), partindo do entendimento de que espaços de experimentação integrados a atividades de aprendizagem potencializam processos de construção de conhecimento em busca de soluções apropriadas às condições locais. Nesse sentido, as agricultoras e agricultores que sediaram essas localidades de geração e intercâmbio de experiências constituíram “faróis agroecológicos” (Fontes, 2013), por apresentarem referenciais representativos da realidade de grupos sociais homogêneos, com problemas e demandas específicas em relação ao tema, permitindo estabelecer fluxos adequados de comunicação junto a grupos de agricultores(as) com características socioeconômicas semelhantes.

É nesse contexto que ocorreram as capacitações em atividades vinculadas à temática dos SAFs biodiversos em projetos da Embrapa Meio Ambiente, sendo alguns de seus principais aspectos educacionais referenciados no diálogo de saberes relatados por Magalhães et al. (2021). De maneira geral, a trajetória seguida no conjunto das ações em análise aponta para as seguintes etapas metodológicas:

- Identificação de agricultores(as) com perfil adequado para sediar as URs.
- Planejamento de ações em equipes formadas por agricultores(as), junto a técnicos(as) e pesquisadores(as) de entidades parceiras que analisam possíveis desenhos para os SAFs de referência, conjugando aspectos tecnológicos com as características e as necessidades das comunidades locais.
- Instalação, manutenção e monitoramento dessas áreas, realizadas predominantemente em formato de mutirões, com intensas atividades coletivas que compatibilizam a geração e o intercâmbio de conhecimentos.

Na Tabela 4.1, pode-se verificar a diversidade de modalidades e o número de eventos ocorridos no decorrer das atividades dos projetos na temática dos SAFs, coordenados pela Embrapa Meio Ambiente ou por parcerias institucionais.

**Tabela 4.1.** Modalidades e quantidade de eventos de capacitação realizados, de 2004 a 2020.

Modalidade de eventos	Número de eventos (2004 a 2020)
Dias de campo	97
Palestras	56
Cursos	32
Oficinas	31
Seminários	30
Vivências de imersão	8
<b>Total</b>	<b>254</b>

Observa-se uma programação de atividades teóricas e práticas, em capacitações na forma de palestras, cursos, oficinas e seminários. Nesse processo de ensino-aprendizagem, houve atividades preparatórias para a instalação das URs e das UOPs em SAFs. Também, após a instalação dessas áreas de pesquisa e demonstrações, foram incentivadas avaliações da trajetória percorrida, possibilitando ajustes técnico-operacionais no decorrer desse itinerário. Durante os dias de campo, as atividades de aprendizagem ao ar livre nesses espaços de diálogo de saberes possibilitaram vivências de um ou mais dias, em que a interação e o aprendizado entre a equipe técnica e agricultoras(es) ocorreram de modo intenso, aliando conhecimentos tradicionais àqueles acumulados pelas instituições científicas. Constituíram-se oportunidades para promover o diálogo entre instituições de pesquisa, unidades de ensino, como universidades e escolas, agricultoras(es) e extensionistas (Camarero et al., 2018).

Uma modalidade que também cabe ser destacada é a dos Cursos de Vivência Agroflorestal. Para apoiar o trabalho de implantação, desenvolvimento e manejo de agroflorestas no Assentamento Sepé Tiaraju (Serra Azul, SP, e Serrana, SP), a Embrapa Meio Ambiente, junto às famílias assentadas e demais parceiros, vem promovendo esse evento de imersão desde 2015. Com período de duração de sete a oito dias, permite aos participantes vivenciarem o dia a dia das famílias assentadas, participando dos momentos de plantio, colheita, comercialização, manejo de seus agroecossistemas e todo seu cotidiano, com ênfase nas agroflorestas. Os participantes se hospedam nas

casas das famílias produtoras, convivem com elas e participam diretamente das ações dentro dos lotes. A programação conta com momentos de imersão em cada lote familiar, mesclados com atividades coletivas de formação teórico-prática, envolvendo a troca de saberes, práticas de manejo, minioficinas temáticas e integração cultural. Até o momento, já foram realizadas oito edições, envolvendo um grande número de estudantes, técnicos e agricultores de diferentes regiões<sup>2</sup>, contribuindo para o fortalecimento e difusão da agrofloresta, bem como para a formação de extensionistas.

Na análise dos caminhos per corridos no componente de capacitação dos projetos coordenados ou em parceria com equipes da Embrapa Meio Ambiente, conclui-se que foram promovidas oportunidades de intercâmbio de conhecimentos em processos participativos de ensino-aprendizagem sobre os fundamentos e as tecnologias associadas aos SAFs. Em decorrência dessas iniciativas, foram propiciadas melhorias em aspectos produtivos e de geração de renda nos SAFs estabelecidos nas URs, bem como em áreas de participantes de eventos que incorporaram esses conhecimentos às suas práticas cotidianas. A equipe da Embrapa Meio Ambiente continua a utilizar e a estudar esses processos de “formação de formadores(as)”, para melhor reconhecer as potencialidades dos métodos de ensino-aprendizagem aplicados a SAFs biodiversos, assim como os limites encontrados, e superá-los em novos projetos.

## ASPECTOS RELACIONADOS AO DESENHO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS BIODIVERSOS

Frequentemente, os SAFs reúnem dezenas de espécies vegetais em uma mesma área. A escolha do conjunto de espécies, a disposição das plantas e o seu desenvolvimento devem ser planejados para garantir aos agricultores boa evolução do sistema, produção e renda nas diferentes fases. Os SAFs mais antigos, implantados no final da década de 1990, eram, em grande parte, mais orientados para o aspecto de recuperação ambiental, utilizavam grande diversidade de espécies, e muitas vezes a disposição das plantas não seguia um padrão bem definido. Com o tempo, algumas dificuldades com esse tipo de desenho, como a limitação de espaços para mecanização, foram reforçando a necessidade de desenhos mais simplificados, em linha, com entrelinhas mais abertas e com menor diversidade de espécies. Alguns aspectos que devem ser considerados em busca de um desenho ideal são: as condições edafoclimáticas para a escolha das espécies; a produção econômica ao longo de todas as fases do ciclo do sistema (ou fases da sucessão); a demanda do mercado regional para os produtos (de-

---

<sup>2</sup> As primeiras Vivências contavam com um número de aproximadamente 20 participantes. Esse número foi crescendo progressivamente; na oitava Vivência, realizada em janeiro de 2020, chegou a quase 100.

finição de “carros-chefe”<sup>3</sup>); a biodiversidade que garante os benefícios ecossistêmicos; a facilidade de mecanização e operações de manejo; a disposição das linhas em função da melhor insolação geral do sistema; e a disposição das espécies em função da sua demanda de luz (estratificação). Essas questões devem ser pensadas não só na dimensão espacial como na temporal, pois o desenvolvimento do sistema implica em forte alteração da disponibilidade de luz e mesmo da composição do sistema ao longo do tempo, dentro da lógica da sucessão ecológica.

A Embrapa Meio Ambiente participou da implantação de vários SAFs ao longo das duas últimas décadas, estabelecendo URs em áreas de agricultores e algumas UOPs no Sítio Agroecológico, em Jaguariúna, SP (Figura 4.1). A seguir, descrevemos brevemente alguns sistemas como forma de ilustrar possibilidades de desenhos para diferentes objetivos.



Foto: Henrique Barros Vieira.

Figura 4.1. Visão geral do Sítio Agroecológico, Embrapa Meio Ambiente – Jaguariúna, SP.

---

<sup>3</sup> “Carro-chefe” é um termo comumente utilizado em SAFs para designar as espécies de maior interesse comercial, as quais vão determinar prioritariamente a estrutura e dinâmica do sistema.

- SAF Medicinal: foi implantado em 2009 no Sítio Agroecológico, reunindo atualmente 32 espécies nativas arbóreas com potencial para uso medicinal, pensado como alternativa para atender ao crescente mercado fitoterápico. A composição do sistema, número de indivíduos por espécie e famílias foi descrita em Cabral et al. (2016), e seus diferentes usos foram descritos em Morichita et al. (2018). Atualmente, identificamos um total 63 aplicações diferentes, utilizando cascas dos caules e as folhas, possibilitando a utilização do sistema como uma “farmácia viva” na propriedade, sem prejuízos para as funções ecológicas.
- SAF Macaúbas: implantado por mutirão, com participação de agricultores familiares e parceiros, em 2009, no Sítio Agroecológico, utilizando 1.140 mudas de mais de 40 espécies diferentes, em uma área de 0,86 ha, ocupando também uma Área de Preservação Permanente (Canuto et al., 2013). A partir do acompanhamento do desenvolvimento de plantas frutíferas e nativas desse sistema, verificou-se, três anos após a implantação, que espécies como os ipês (dos gêneros *Handroanthus* Mattos e *Tabebuia* Gomes ex DC.), a banana (*Musa paradisiaca* L.), o sombreiro (*Clitoria fairchildiana* R. A. Howard), a aroeira pimenteira (*Schinus terebinthifolia* Raddi), o jenipapo (*Genipa americana* L.), o cedro (*Cedrela fissilis* Vell.), a goiaba (*Psidium guajava* L.), o mulungu (*Erythrina falcata* Benth.), a escova-de-macaco (*Apeiba tibourbou* Aubl.) e a pitanga (*Eugenia uniflora* L.) mostraram-se bastante resistentes a condições pouco favoráveis ao seu estabelecimento. Plantadas como mudas de pequeno porte, essas espécies enfrentaram estiagem prolongada, ataque de capivaras, competição com braquiária e baixa frequência de manejo. Elas exibiram uma elevada taxa de sobrevivência (superior a 70%) quando comparadas às demais espécies, particularmente, à macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.), à romã (*Punica granatum* L.) e à jaboticaba (*Plinia peruviana* (Poir.) Govaerts), cujos valores de sobrevivência foram inferiores a 50% (Malagodi-Braga et al., 2014).
- SAF Horta: implantado em junho de 2011, em uma área de pastagem degradada de 2.500 m<sup>2</sup> no Assentamento 17 de Abril (Restinga, SP). Teve como objetivo principal criar um ambiente de experimentação e disseminação das práticas agroecológicas de produção e dos SAFs na produção de hortaliças. O desenho idealizado de forma participativa com os assentados envolvidos estabeleceu três áreas para os canteiros de hortaliças e uma área para a realização de compostagem, que iam sendo alternadas de posição no terreno ao longo do tempo, e contemplou a instalação, na área central do terreno, de um minhocário integrado ao sistema (Figura 4.2). As linhas de árvores (frutíferas e nativas) foram plantadas em toda a borda do sistema e forneciam proteção contra o vento e incremento na diversidade biológica, além de produzirem frutas e biomassa (Oliveira et al., 2011).

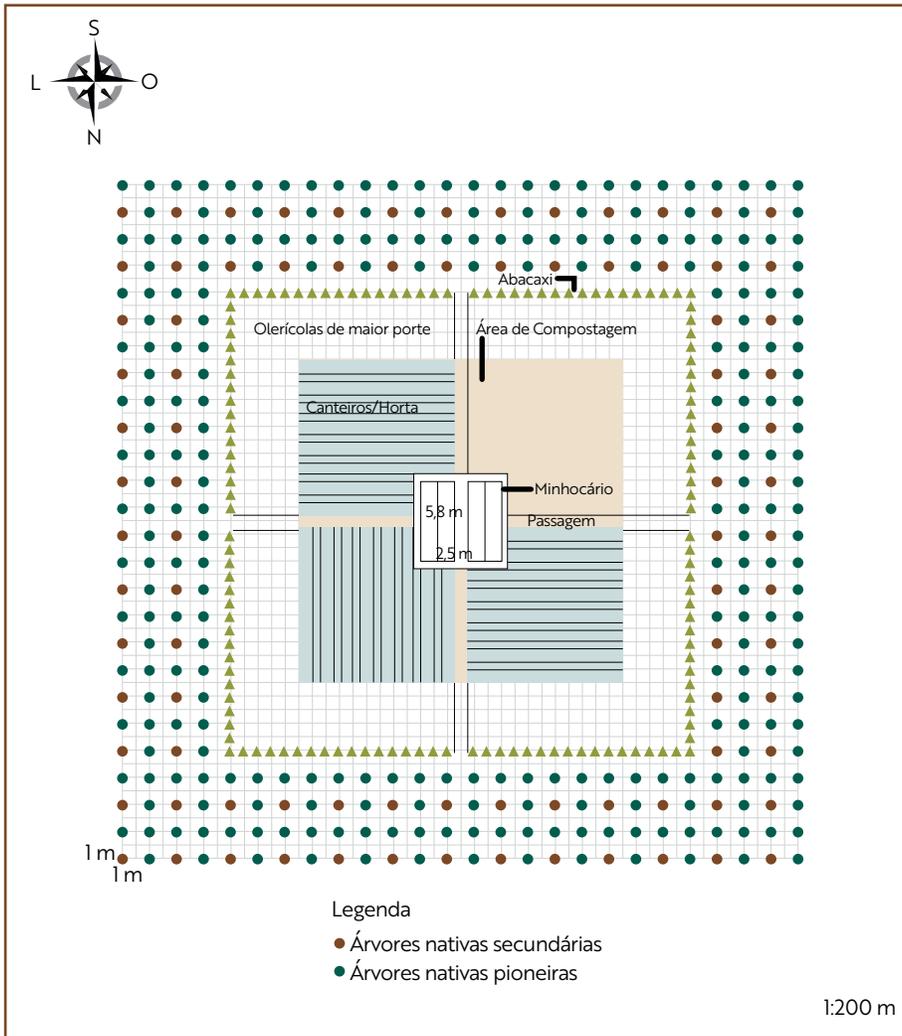


Figura 4.2. Desenho esquemático da Unidade de Referência (UR) SAF Horta.

Fonte: Oliveira et al., 2011

- SAF Abelhas: O sistema foi implantado em 2013 em uma área de aproximadamente 1.000 m<sup>2</sup> no Sítio Agroecológico, com o plantio de 231 mudas de árvores, abrangendo 21 famílias e 44 espécies. Seu objetivo foi o de ser uma fonte de recursos (néctar, pólen e resina) para as abelhas da área, de maneira geral, assim

como para as colônias de abelhas-sem-ferrão do Meliponário Experimental da Embrapa Meio Ambiente, instalado em 2010 em área contígua ao SAF. Seu desenho e planejamento de condução tiveram como premissa a disponibilidade escalonada de recursos ao longo de todo o seu desenvolvimento e em todas as estações do ano (Canuto et al., 2017).

- SAF Frutas: Baseado na interação com experiências dos agricultores, foi implantado em janeiro de 2018 no Sítio Agroecológico para fins de observações e experimentações mais controladas (Figura 4.3). Nesse SAF, com área de 0,12 ha, buscou-se simular alguns desenhos que, com suas variações locais, vêm sendo desenvolvidos em situações de campo no estado de São Paulo desde 2014, pela Embrapa Meio Ambiente e parceiros<sup>4</sup>. O desenho utiliza espaçamento maior entre as linhas de árvores e dois tipos de linhas de árvores: 1) linhas “especializadas” (com frutíferas comerciais plantadas em linhas separadas das árvores destinadas à produção de biomassa); e 2) linhas “mistas” (árvores frutíferas e para biomassa na mesma linha), com objetivo de avaliar e demonstrar as duas alternativas. A linha especializada é mais imune a atrasos e à ausência de podas regulares nas árvores destinadas a produzir biomassa, enquanto as linhas mistas facilitam a alocação da biomassa, com um menor deslocamento de material, mas são mais sensíveis a atrasos na poda (Magalhães et al., 2021). As entrelinhas do SAF, com largura de 5 m, apresentam dois tipos de uso, de forma alternada: 1) uma “entrelinha de biomassa”, com o cultivo de diferentes gramíneas que são periodicamente roçadas (posteriormente, a biomassa gerada é enleirada junto às linhas de árvores como cobertura morta, para aporte de matéria orgânica, conservação da umidade do solo e controle de espécies espontâneas); e 2) outra “entrelinha de produção”, com cultivos agrícolas para produção econômica de alimentos, como culturas anuais e hortaliças.

---

<sup>4</sup> Para uma caracterização detalhada desse desenho, ver Magalhães et al. (2021), Mine et al. (2018) e Neves et al. (2017).

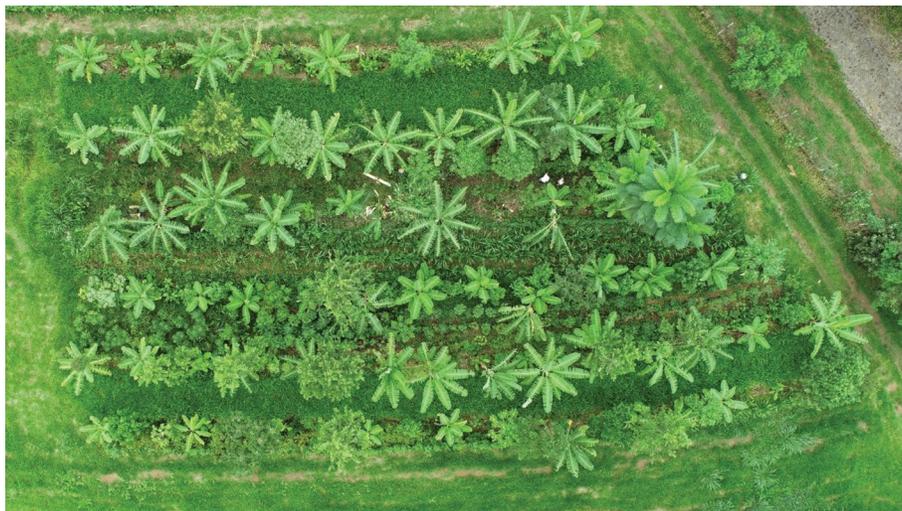


Foto: Henrique Barros Vieira.

Figura 4.3. Ortofoto do SAF Frutas, em março de 2021.

Todas essas parcelas de SAFs foram ou continuam sendo ativamente utilizadas como espaços para eventos de capacitação de agentes multiplicadores, seja por visitas guiadas ou em eventos como dias de campo, despertando bastante interesse de agricultores, técnicos e estudantes, propiciando um rico intercâmbio de saberes e aportando importantes contribuições para a sequência das atividades de pesquisa.

## RESULTADOS DE PESQUISA: ASPECTOS AMBIENTAIS, TÉCNICOS E SOCIOECONÔMICOS EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS BIODIVERSOS

Na condição de sistemas complexos e multifuncionais, os SAFs biodiversos têm sido desenhados, implantados, monitorados e avaliados visando à recuperação das condições ambientais, o aumento da biodiversidade (flora e fauna), o uso mais eficiente de recursos naturais como água e solo, a adequação à legislação ambiental, a viabilidade socioeconômica, a segurança alimentar e a reprodução social na agricultura familiar.

Esta seção apresenta de forma sucinta alguns dos resultados de pesquisa obtidos nos projetos mais recentes, abrangendo aspectos ambientais, técnicos e socioeconômicos dos SAFs estudados.

## ENTOMOFAUNA

Quanto aos aspectos ambientais, cabe destacar estudos sobre a diversidade de insetos em SAFs, considerando as diversas funções ecológicas que eles podem assumir no ambiente. Apesar de alguns serem prejudiciais às plantas, pela herbivoria e/ou transmissão de doenças, muitos são benéficos, atuando, por exemplo, no controle natural de herbívoros (conhecidos por inimigos naturais) e realizando a polinização.

Para evitar problemas fitossanitários envolvendo ataque de insetos herbívoros nas plantas cultivadas, é desejável que exista um equilíbrio no agroecossistema, com a ação de inimigos naturais atuando na regulação da população desses herbívoros (Dainese et al., 2019). Por meio do levantamento da entomofauna presente em uma das parcelas de agrofloresta no Sítio Agroecológico da Embrapa Meio Ambiente (o SAF Frutas), foi possível verificar grande diversidade de insetos associados ao plantio de hortaliças, sendo Diptera (51,7%), Hymenoptera (21,1%), Coleoptera (17%) e Hemiptera (8,7%) as ordens coletadas com maiores porcentagens de insetos (Peixoto et al., 2020).

Em outro levantamento no Sítio Agroecológico, comparando parcelas de hortas experimentais dentro e fora de SAFs, constatou-se que hortaliças cultivadas dentro do sistema apresentam maiores índices de diversidade e de equitabilidade da entomofauna associada quando comparadas a hortaliças cultivadas a pleno sol (Monteiro et al., 2020). Além disso, em hortaliças cultivadas em SAF, observou-se maior ação de predadores, destacando a importância desse sistema para o equilíbrio da entomofauna, o controle biológico natural e a relação entre os insetos e as plantas (Monteiro et al., 2020).

Quanto à polinização e aos polinizadores, por sua vez, é interessante notar que, apesar das múltiplas funções que as árvores podem desempenhar nos SAFs, poucos estudos têm avaliado a atratividade dessas plantas como fonte de recursos para os polinizadores, particularmente para as abelhas nativas. Em Florestas Tropicais, boa parte das espécies arbóreas são polinizadas por animais, em sua maioria abelhas (Michener, 2007). Isso sugere que boa parte das árvores nativas utilizadas em SAFs tem potencial para atrair e manter uma diversidade de abelhas nativas pela oferta de recursos florais. Em estudo recente, realizado nos SAFs das UOs da Embrapa Meio Ambiente, Lima et al. (2020a) verificaram que as abelhas nativas, sem ferrão (*Meliponini*) e com ferrão (não *Meliponini*), foram representadas por mais de 60 espécies no local, apontando para o importante papel que esses sistemas podem desempenhar na atração e conservação da biodiversidade em paisagens dominadas pelos seres humanos (Bhagwat et al., 2008). Essas espécies visitaram as flores de 73 espécies vegetais pertencentes a 26 famílias botânicas, sendo, a maioria delas, árvores nativas. A família Fabaceae, que é bastante utilizada em SAFs pela sua diversidade de funções – associação com bactérias fixadoras de nitrogênio, fornecimento de madeira, de matéria

orgânica e de alimento para os agricultores –, destacou-se com mais de 32% das espécies visitadas, revelando-se uma fonte importante de recursos para as abelhas nativas. Dentre as espécies de Fabaceae, Lima et al. (2020a) destacaram o angico (*Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan), a canafistula (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.) o jacarandá-bico-de-pato (*Machaerium acutifolium* Vogel), o monjoleiro (*Senegalia polyphylla* (DC.) Britton & Rose), a unha-de-vaca (*Bauhinia variegata* L.), o pau-brasil (*Paubrasilia echinata* (Lam.) Gagnon, H. C. Lima & G. P. Lewis), entre outras espécies. Esses resultados revelam o potencial dos SAFs biodiversos e agroecológicos para a conservação das abelhas nativas e para a integração com a meliponicultura, a criação de abelhas-sem-ferrão. Essa integração, além dos diversos benefícios que pode trazer para a agricultura familiar, como o uso alimentar e medicinal dos produtos das abelhas e a possibilidade de diversificação da renda, pode também aumentar o potencial produtivo das plantas cultivadas que se beneficiam com a polinização realizada por esses insetos. Outros estudos estão em andamento e pretendem ampliar esse conhecimento, com foco na integração entre a meliponicultura e os SAFs biodiversos.

## USO EFICIENTE DA ÁGUA

A eficiência no uso da água, tema pelo qual o interesse vem crescendo ao longo dos anos, relaciona o volume de água utilizado na produção de alimentos e o volume de água que se perde durante esse processo (Voltolini et al., 2018). As condições microclimáticas proporcionadas pelos SAFs, como a redução da radiação solar e velocidade dos ventos e o aumento da umidade relativa do ar, podem reduzir a evapotranspiração e aumentar o teor de umidade do solo, melhorando a eficiência no uso da água. Adicionalmente, o planejamento do consórcio de espécies e as técnicas de manejo desses sistemas podem melhorar ainda mais essa eficiência.

Nesse sentido, foram realizadas pesquisas para avaliar a produção e a eficiência no uso da água de irrigação por gotejamento em cultivos solteiros e consorciados de espécies de hortaliças, como também em cultivos consorciados com e sem o uso de cobertura do solo, ambos em entrelinha de um SAF e a pleno sol. De acordo com Hurlia et al. (2018), os resultados demonstraram que, utilizando-se a mesma quantidade de água, a produção total de massa seca da alface (*Lactuca sativa* L.) no SAF, consorciada com rúcula (*Eruca sativa* L.) e rabanete (*Raphanus sativus* L.), apresentou diferença significativa e média superior quando comparada ao cultivo de alface solteiro. Para os parâmetros diâmetro e número de folhas de alface, não houve diferenças significativas entre os dois arranjos de cultivo, embora as médias dos valores da alface consorciada tenham sido superiores ao cultivo solteiro. A massa seca da alface consorciada no SAF foi superior, porém, não apresentou diferença significativa quando comparada com

o cultivo a pleno sol. Os autores concluem que o consórcio de espécies de hortaliças apresentou uma interação positiva no SAF, revelando-se vantajoso em relação ao cultivo solteiro da alface, ao produzir uma maior quantidade de hortaliças por unidade de área e promover um uso mais eficiente da água (Hurpia et al., 2018).

Em outro experimento realizado no Sítio Agroecológico, adotando uma irrigação diferenciada após o estabelecimento das plantas consorciadas de cenoura (*Daucus carota*), salsa (*Petroselinum crispum*) e cebolinha (*Allium schoenoprasum*), com base nos teores de umidade do solo e na exigência hídrica da cenoura, foi avaliada a influência da cobertura morta na retenção de água do solo e a produtividade dessas hortaliças. Os resultados demonstraram que, na condição de cultivo no interior do SAF, os teores de umidade do solo ao longo de todo o experimento foram menores no solo descoberto quando comparado ao solo com cobertura. Esse resultado corrobora Resende et al. (2003) e Oliveira e Souza (2003), citados por Bueno et al. (2019), que observaram maiores teores de umidade em solos com cobertura morta quando comparados com solos sem cobertura em cultivos de cenoura e banana, respectivamente, demonstrando a influência do uso de cobertura na maior retenção de umidade do solo. Embora os valores das médias dos parâmetros de produtividade das três hortaliças consorciadas não tenham apresentado diferenças significativas para os diferentes tipos de cobertura do solo, as médias de desempenho de produção das hortaliças cultivadas com cobertura do solo foram superiores às daquelas cultivadas em solo descoberto (Bueno et al., 2020).

## MANEJO DA BIOMASSA

Em SAFs, além das culturas agrícolas de interesse comercial, faz-se uso de espécies forrageiras, arbustivas, gramíneas e arbóreas destinadas à produção de biomassa. Porém, pouco ainda se sabe sobre a produtividade das espécies e qual área e número de indivíduos de cada espécie arbórea seriam necessários para suprir a demanda nutricional do sistema. Visando contribuir com a superação dessas lacunas, Magalhães et al. (2020) realizaram o monitoramento da produção de biomassa e crescimento das espécies arbóreas mutambo (*Guazuma ulmifolia* L.), eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) e da gramínea capim-mombaça (*Megathyrsus maximus* syn. *Panicum maximum* cv. Mombaça) em um modelo de SAF implantado na Embrapa Meio Ambiente, em Jaguariúna, SP. Considerando as arbóreas, o mutambo se destacou no crescimento e no fornecimento de biomassa, com taxas de crescimento médio de  $32,6 \pm 5,8$  cm mês<sup>-1</sup> em 15 meses e média acumulada de matéria seca para um indivíduo de  $1,96 \pm 0,74$  kg, em 19 meses. Para o eucalipto, a taxa de crescimento e acúmulo de biomassa foram, respectivamente de  $18,2 \pm 11,7$  cm mês<sup>-1</sup> e  $0,80 \pm 0,75$  kg. O capim-mombaça, por sua

vez, mostrou-se capaz de fornecer biomassa rapidamente para um sistema recém implantado. Considerando cortes realizados após período de crescimento em meses chuvosos, a produtividade média do capim-mombaça no sistema foi de  $6,3 \pm 1,6 \text{ t ha}^{-1}$  a cada corte, sendo a produtividade maior na porção das bordas quando comparada ao meio da entrelinha (Magalhães et al., 2020).

## ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS

A partir do monitoramento de uma parcela de SAF no Assentamento Sepé Tiaraju durante seus primeiros 19 meses de implantação, Ramos-Filho et al. (2017) avaliaram a demanda por mão de obra desse sistema. Foram identificadas 13 operações potencialmente demandantes de mão de obra relacionadas ao manejo do SAF. Considerando o período referente a um ciclo agrícola completo (outubro de 2015 a setembro de 2016), a operação que mais demandou mão de obra foi a capina (66%). Por outro lado, o percentual muito baixo de mão de obra utilizada para as operações de roçagem (1%) e amontoa (2%) deixou evidente a opção inicial do agricultor por uma estratégia mais convencional de manejo da biomassa no sistema, caracterizada pela capina. Já a análise do fluxo de demanda de mão de obra mensal revelou uma grande variação sazonal, sendo que nos meses de maior demanda de trabalho, correspondentes ao período chuvoso (outubro a março), quando ocorre o maior desenvolvimento de biomassa no sistema, a demanda efetiva de trabalho no SAF correspondeu a valores bastante elevados, entre 12 e 29,4 dias homem  $\text{ha}^{-1}$ , enquanto nos meses de maior seca (julho a setembro) não foi utilizada nenhuma mão de obra no SAF.

Conclui-se que é fundamental pensar alternativas técnicas que elevem a produtividade do trabalho, principalmente na operação de capina – incluindo a adoção de estratégias mais eficientes de manejo da biomassa – e, por outro lado, pensar dinâmicas de manejo que permitam uma melhor distribuição das atividades ao longo do ano, principalmente nos períodos de seca, quando poderiam ser concentradas as operações de poda, desbaste e amontoa da biomassa. Os autores concluíram que essas medidas são importantes para reduzir a dependência do aporte de mão de obra extrafamiliar, ou para que o SAF não tenha um manejo insuficiente em algumas épocas do ano, o que pode comprometer o desenvolvimento do sistema e seu retorno econômico.

Em um exercício de avaliação econômico-financeira, a partir de dados da parcela experimental do SAF Frutas instalado na Embrapa Meio Ambiente (dados reais de monitoramento nos primeiros 22 meses e projeção para dez anos, com base em coeficientes técnicos obtidos na literatura), Iunes (2021) obteve indicadores financeiros considerando dois cenários: otimista (preços dos produtos baseados em

mercados de venda direta) e pessimista (preços dos produtos baseados na venda no atacado, para intermediários). Os resultados obtidos, convertidos para uma área equivalente de 1 hectare, encontram-se sintetizados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2.** Comparativo de indicadores financeiros entre o cenário pessimista e otimista – SAF Frutas da Embrapa Meio Ambiente, projeção para dez anos, convertidos para 1 hectare.

Avaliação financeira	Cenário pessimista	Cenário otimista
Taxa de desconto:	6%	6%
TIR do projeto:	34,18%	63,78%
VPL do projeto:	R\$ 232.120,03	R\$ 476.216,01
VAE do projeto:	R\$ 31.537,67	R\$ 64.792,23
Payback simples:	5	4
Payback descontado:	5	4
Relação B/C	1,9	2,73

TIR: Taxa Interna de Retorno; VPL: Valor Presente Líquido; VAE: Valor Anual Equivalente; Relação B/C: Relação Benefício/Custo.

Fonte: Iunes (2021).

Embora os indicadores do cenário otimista sejam significativamente mais favoráveis que os valores do cenário pessimista, conclui-se que o saldo final de ambos os cenários, no período projetado de dez anos, ainda é positivo. Tomando como exemplo os valores da Taxa Interna de Retorno (TIR), respectivamente 63,78% e 34,18% para os cenários otimista e pessimista, ambos foram superiores a 30%, valor mínimo necessário para garantir a viabilidade financeira na agricultura familiar, segundo Hoffman (2013). Portanto, esses dados demonstram que, ainda que os produtos sejam comercializados em mercados de atacado, o projeto apresenta indicativos de viabilidade. Por outro lado, fica evidente que a busca por formas de escoamento e comercialização que valorizem não só a agricultura familiar, mas também o cultivo de alimentos saudáveis e provenientes de sistemas regenerativos como os SAFs, são imprescindíveis para obter maiores rendimentos e, conseqüentemente, resultados financeiros mais atrativos.

## COMERCIALIZAÇÃO E AGREGAÇÃO DE VALOR À PRODUÇÃO AGROFLORESTAL

A produção dos SAFs biodiversos tende a ser composta por uma grande variedade de itens, refletindo o conjunto de espécies que integram o sistema. Isso traz impactos positivos, como a melhoria na qualidade da dieta das famílias produtoras pelo autoconsumo e, de forma geral, na segurança alimentar, ampliando a oferta variada de alimentos aos consumidores. No entanto, o perfil da produção com muitos itens em quantidades menores, em função do menor número de plantas de uma mesma espécie por área do sistema, traz uma dificuldade adicional ao escoamento do conjunto da produção.

Considerando essa característica específica dos SAFs biodiversos e a importância do processo de comercialização para garantir a viabilidade econômica desses sistemas e a rentabilidade das famílias agricultoras, a equipe de Agroecologia da Embrapa Meio Ambiente passou a incluir em seus projetos de pesquisa, a partir de 2015, uma forte ênfase nessa temática. O objetivo desses estudos e pesquisas é compreender melhor as estratégias que vêm sendo utilizadas pelos agricultores familiares agroflorestais, analisar as características dos principais canais de comercialização utilizados e subsidiar a discussão sobre estratégias inovadoras que auxiliem os agricultores agroflorestais e suas organizações no acesso a novos canais de comercialização, mais adequados à produção do SAFs, bem como a processos que ampliem a agregação de valor aos seus produtos. Nesta seção, buscaremos fazer uma breve compilação dos estudos e ações de desenvolvimento realizados até o momento.

Em Ueno et al. (2016), foi apresentada uma tipologia dos canais de comercialização utilizados pela agricultura familiar e discutidas as principais características dos canais. Em termos gerais, podemos classificar os canais de comercialização em dois grandes grupos, em função da relação de proximidade entre o produtor e o consumidor final: comercialização de circuito longo e circuito curto. A comercialização de circuito longo é representada pelas cadeias agroalimentares com a presença de intermediários, distanciando o produtor do consumidor final. Uma característica importante é a diferença de poder na negociação entre o produtor agrícola e o comprador imediato. Esse desequilíbrio resulta em uma pressão sobre o preço pago ao produtor. Nesses canais, são comercializados produtos com demanda nacional ou internacional. Exemplos de canais de circuito longo são aqueles formados por redes de supermercados, grandes centros de distribuição de alimentos, indústrias de alimentos, entre outros. Já na comercialização de circuito curto, há uma proximidade maior entre o produtor e o consumidor final. Essa proximidade não é necessariamente geográfica e pode ser baseada no conhecimento e valorização da origem ou da forma de produção dos alimentos. Exemplos mais tradicionais desse tipo de comercialização são as dife-

rentes modalidades de venda direta ao consumidor (como em feiras, na propriedade, em pontos nas ruas das cidades, de porta em porta e por encomenda), vendas a pequenos comerciantes e empresas próximas e comercialização por meio de cooperativas e associações de produtores.

Considerando as características da produção dos SAF, os canais de comercialização mais adequados são os de circuito curto. Primeiro, por tornarem possível a comercialização de produtos regionais e diversificados; segundo, por possibilitarem uma negociação mais justa, conferindo potencialmente melhor renda aos produtores; e, por último, por favorecerem uma relação mais próxima entre o produtor e consumidor, permitindo a valorização do sistema de produção adotado e sua origem, dispensando, em alguns casos, a exigência de certificação.

As compras governamentais, em função da sua magnitude, são utilizadas em diversos países para implementar políticas públicas, atendendo a diferentes objetivos econômicos, sociais e ambientais (Costa; Terra, 2019). No Brasil, há duas experiências relevantes voltadas para a produção da agricultura familiar: o Programa Nacional de Alimentação Escolar (Pnae) e o Programa de Aquisição de Alimentos (PAA).

O Pnae foi criado em 1955, sendo a primeira política pública voltada para a segurança alimentar, mas foi com a promulgação da Lei nº 11.947, de 16 de junho de 2009, que o programa passou a priorizar a agricultura familiar, direcionando a ela um patamar mínimo obrigatório de 30% das compras de alimentos para a merenda escolar realizadas pelos municípios com seus recursos. Além disso, estabeleceram-se critérios de preferência para a aquisição de alimentos orgânicos e produzidos em assentamentos da reforma agrária, comunidades indígenas e quilombolas. Na análise do Pnae feito por Saraiva et al. (2013), considerando os dados de 2010 (o primeiro ano de obrigatoriedade de compras da agricultura familiar), verificou-se que 47% dos municípios brasileiros adquiriram produtos da agricultura familiar, porém, o percentual médio de compras dessa modalidade ficou abaixo do estabelecido em lei. Foi apontado como justificativa mais frequente por parte dos municípios a indisponibilidade de oferta regular de alimentos. Os agricultores, por sua vez, reportam como dificuldades do Pnae a exigência mais voltada à aparência dos produtos do que à sua qualidade ecológica e nutricional, a demanda restrita a poucos itens e a requisição de produtos agrícolas não produzidos localmente. Os problemas registrados em relação ao Pnae são solucionáveis com o planejamento e diálogo envolvendo os agentes municipais e agricultores para correção dos problemas.

O PAA foi instituído pelo artigo 19 da Lei nº 10.696, de 2 de julho de 2003, que forneceu a base legal para a aquisição de alimentos diretamente dos agricultores familiares. Sofreu várias alterações ao longo dos anos, tornando-se um interessante canal de comercialização para os agricultores familiares, sobretudo para os produtores agroflorestais. O PAA escolhe grandes variedades de itens, a preço justo e com um adicional

para produtos orgânicos. Essas características fazem do PAA um canal bem adequado para escoar a produção dos sistemas biodiversos.

As principais limitações do PAA apontadas pelos agricultores são o valor da cota anual, atingida pelos produtores em poucos meses, e a demora em estabelecer novos contratos. Mesmo nos melhores anos de execução do programa, também era manifestado frequentemente pelos agricultores o receio de estabelecer uma dependência do PAA, temendo sua descontinuidade. De acordo com os valores corrigidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) para dezembro de 2018, o Governo Federal investiu no PAA pouco mais de R\$ 400 milhões em seu primeiro ano (2003), atingindo o pico em 2013, quando foram investidos quase R\$ 1,2 bilhões. Nos anos seguintes, porém, o investimento foi diminuindo até atingir menos de R\$ 300 milhões, em 2018 (Almeida et al., 2020).

Em estudo desenvolvido pela Embrapa Meio Ambiente com agricultores assentados da reforma agrária no Assentamento Sepé Tiaraju durante o ano de 2016, foi observada a relevância dos mercados institucionais para aquele conjunto de agricultores (Oliveira et al., 2017). Foi verificado também que a maioria dos agricultores familiares utilizava como estratégia uma combinação de vários canais de comercialização, aproveitando características complementares dos diferentes canais para melhorar sua renda. Outra constatação do mesmo estudo foi a permanência de atravessadores como mecanismo recorrente para escoar parte da produção, indicando que os canais de comercialização mais justos, como os institucionais, não eram suficientes para escoar toda a produção.

Pela importância dos canais de circuito curto para agricultura familiar e a comercialização da produção dos sistemas biodiversos, serão discutidas algumas tendências e experiências inovadoras na exploração desse grupo de canais.

Nos últimos anos, com a popularização e evolução dos dispositivos eletrônicos móveis (smartphones) e dos aplicativos de redes sociais, as vendas por encomendas ganharam força, facilitando muito a comunicação entre produtores e consumidores. Mais recentemente, a pandemia de covid-19 e as consequentes medidas restritivas deram um novo impulso para as vendas por encomendas, o que também influenciou na comercialização dos produtos da agricultura familiar. Nada indica que esse tipo de canal vá deixar de crescer, mesmo com o arrefecimento da crise sanitária.

Uma outra tendência que vem ganhando relevância e tem características favoráveis à comercialização da produção de SAF é a montagem de grupos de consumo, normalmente baseados ou influenciados pela ideia do consumo consciente ou consumo responsável. Nesse tipo de relação, as preocupações sociais e ambientais influenciam na decisão de compra do consumidor. Uma relação produtor-consumidor ainda mais avançada ocorre nos modelos baseados no movimento Comunidade que Sustenta a Agricultura (CSA). Neste, os consumidores são considerados coprodutores: partici-

pam do planejamento da produção e do processo de distribuição dos alimentos e também assumem os riscos de perdas na produção (Junqueira; Do Amaral Moretti, 2018).

Além da busca e construção de canais de comercialização apropriados, outro aspecto relevante para o aumento da renda dos agricultores e o fortalecimento dos SAFs é a agregação de valor à produção. A agregação de valor pode se dar tanto pelo processamento dos produtos quanto pelo reconhecimento do consumidor de algum atributo para além do produto em si, como o sistema de produção empregado e a origem da produção.

O processamento dos alimentos pode variar de um simples particionamento em pequenas embalagens, que alcançam valores mais expressivos por quilo, até processos mais complexos, como a produção de farinhas, compotas, polpas, doces, pães etc. Os processamentos mais elaborados demandam equipamentos e conhecimentos específicos, além de locais apropriados para o processamento, que podem ser impeditivos relevantes para a maioria dos agricultores familiares. Nos estudos conduzidos pela Embrapa Meio Ambiente, foram observadas iniciativas de montagem de pequenas agroindústrias tanto por coletivos de agricultores quanto individualmente. Foram identificados alguns casos de sucesso, em que boa parte da produção do SAF é processada, aumentando de forma significativa os rendimentos. Além do valor agregado ao produto, o processamento mais elaborado dos alimentos (como em conservas e doces) confere tempo de prateleira aos produtos, evitando as perdas e distribuindo a renda com a venda da produção ao longo de vários meses. Um último aspecto positivo a ser considerado é que o processamento dos alimentos na propriedade possibilita a reincorporação dos resíduos do processamento aos sistemas produtivos.

A agregação de valor também pode se dar em função do reconhecimento por parte dos consumidores de atributos extrínsecos ao produto, considerando, por exemplo, os impactos positivos do sistema de produção adotado, os aspectos sociais ou o território onde se dá a produção (identificação de origem). Para explicitar esses atributos, são utilizados selos e certificações, tais como certificado de produção orgânica, selo de agricultura familiar e variados selos de origem. Em canais de comercialização alternativos, pelos quais os consumidores tornam-se próximos aos produtores a ponto de conhecerem os sistemas produtivos, essas certificações podem ser dispensadas. De qualquer forma, é fundamental aumentar a difusão do conhecimento geral sobre os SAFs e seus impactos positivos, ampliando a demanda e a valorização dos seus produtos.

Dois exemplos práticos que seguem essa direção e que contaram com importante apoio técnico da Embrapa Meio Ambiente para sua criação e desenvolvimento são: o Grupo de Consumo Agroecológico (GCA) Sepé Tiaraju, criado em agosto de 2019, e a Rede Agroflorestal da Região de Ribeirão Preto (Rede SAF-RP), criada no mesmo ano, articulando diversos parceiros envolvidos com a temática agroflorestal. O GCA, um grupo de consumo consciente para comercialização direta de produtos agroflorestais

e agroecológicos, reuniu famílias de produtores agroflorestais do Assentamento de Reforma Agrária Sepé Tiaraju e um grupo de consumidores, em sua maioria vinculados à comunidade acadêmica da Universidade de São Paulo (USP), campus de Ribeirão Preto. A equipe técnica da Embrapa colabora no planejamento produtivo, na organização do grupo e no desenvolvimento de planilhas e ferramentas digitais de gestão. Atualmente, o GCA conta com a participação ativa de 12 famílias de agricultores, que se associam para o fornecimento cestas de alimentos agroecológicos. Ainda que se trate de uma experiência recente e com muito potencial de crescimento, seus benefícios econômicos já são sentidos pelas famílias (que recebem um preço maior que o do mercado convencional) e pelos consumidores (que pagam um preço menor que o do mercado de orgânicos), além de promoverem a valorização da agrobiodiversidade dos SAFs (Lima et al., 2020b). Em relação à Rede SAF-RP, as ações implantadas, principalmente a partir de abril de 2020, com o início da pandemia da covid-19, ampliaram as alternativas de comercialização e geração de renda, incluindo a criação de um segundo GCA na cidade de Ribeirão Preto e da campanha “Alimentos agroecológicos para todos”, trazendo assim bastante motivação aos agricultores assentados agroecológicos e agroflorestais, que puderam escoar seus produtos em um momento em que os mercados estavam bastante restritos devido à pandemia, e ao mesmo tempo contribuindo para a segurança alimentar de comunidades da periferia de Ribeirão Preto<sup>5</sup> (Guimarães et al., 2020). O objetivo da participação da Embrapa Meio Ambiente nesses dois processos, além de colaborar diretamente para a melhoria da renda dos agricultores e a difusão dos SAFs na região, é também avançar os estudos e pesquisas para desenvolver modelos de comercialização de produtos de SAF replicáveis em assentamentos de reforma agrária e comunidades de agricultores familiares.

Outra estratégia interessante de divulgação dos SAF e abertura de canais de venda direta é o desenvolvimento de atividades presenciais, nas quais os interessados conhecem os sistemas *in loco*. A forma mais simples de implementação dessa estratégia é a visita guiada, em que o agricultor apresenta o sistema aos visitantes. Um bom exemplo é a experiência do Sítio Bela Vista (localizado no município de Cananéia, SP), sistematizada pelo projeto Seisaf, em que a família recebe visitas organizadas por agências de turismo, em passeios voltados a dois públicos-alvo: estudantes e melhor idade. O passeio contempla atividades de educação ambiental, visita aos

---

<sup>5</sup> Trata-se de uma campanha de arrecadação financeira junto à sociedade civil, organizada pela Rede SAF-RP. O montante arrecadado é utilizado para a compra de alimentos agroflorestais de agricultores familiares da região, que são doados às populações em vulnerabilidade no município de Ribeirão Preto. Nas duas primeiras etapas da campanha (entre junho e dezembro de 2020), foram doadas cerca de 16 toneladas de alimentos, equivalente a um valor de aproximadamente R\$ 42.000,00 arrecadados junto à sociedade civil (Guimarães et al., 2020).

SAFs e ao meliponário. No passeio, é oferecida alimentação aos visitantes com produtos do SAF. O turismo e as vendas que ele alavanca são responsáveis por parte importante da renda total do sítio. Além disso, o sítio processa a maior parte dos produtos do SAF, de forma que mantém sempre um conjunto de itens disponíveis para a venda direta na propriedade e na feira semanal na cidade, seus dois principais canais de comercialização.

Uma forma mais intensa de atividade presencial é através de vivências de imersão, como as que a Embrapa Meio Ambiente tem organizado desde 2015 no Assentamento Sepé Tiaraju. Nesses eventos, os participantes passam alguns dias na propriedade ou comunidade, inseridos em atividades de implantação e manejo de SAFs. Esse tipo de atividade promove uma visão realista dos sistemas e aproxima a sociedade dos agricultores, criando uma ampla rede sociotécnica para divulgação e consumo de seus produtos.

## CONTRIBUIÇÕES TÉCNICAS PARA LEGISLAÇÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS

Para que o potencial dos SAFs seja efetivamente aproveitado, o ambiente político e institucional precisa oferecer aos agricultores incentivos claros para plantar e proteger as árvores que corroboram o funcionamento do ecossistema e para garantir os meios de subsistência rurais (Ashley et al., 2006).

Nesse sentido, em 2019, a equipe de Agroecologia da Embrapa Meio Ambiente concluiu o projeto Seisaf, que, entre outros resultados, gerou um documento (Embrapa Meio Ambiente, 2019) que analisa e sistematiza as principais legislações ambientais federais então vigentes quanto às suas implicações diretas e indiretas para os SAFs: o Novo Código Florestal (Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012) e a Lei da Mata Atlântica (Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006), com sua respectiva regulamentação (Decreto nº 6.660, de 21 de novembro de 2008). Por meio dessa análise, buscou-se identificar os potenciais impactos dessas normativas na adoção e manejo de SAFs pela agricultura familiar das regiões Sul e Sudeste do Brasil e, assim, contribuir para o aprimoramento do aparato legal vigente, de modo a reconhecer o potencial conservacionista e regenerativo da prática produtiva dos SAFs.

A equipe também sistematizou o conhecimento e a percepção dos agricultores familiares sobre os entraves e as oportunidades derivadas da legislação e das políticas públicas vigentes. No estado de São Paulo, foram avaliadas 22 experiências com SAFs, em sua maioria coletivas, caracterizando processos sociais mais amplos e comunitários, sendo 12 em Assentamentos de Reforma Agrária. A coleta de dados, realizada nos anos de 2017 e 2018, deu-se por meio de entrevistas semiestruturadas. Na percep-

ção, principalmente, dos agricultores e agricultoras, o conhecimento sobre a legislação ambiental era superficial e, em geral, pouco aplicado à seleção das espécies para a composição dos SAFs; a maioria ressaltou a ausência de assessoramento por órgãos públicos. Entretanto, os entrevistados relataram diversos entraves legais que, segundo eles, estariam impactando a reprodução desses sistemas e gerando uma situação de insegurança na adoção e manejo dos SAFs.

Paralelamente, a equipe vem atuando desde 2017 no grupo de trabalho Painel sobre Sistemas Agroflorestais (Painel SAF), criado oficialmente pela SMA-SP e composto por representantes de instituições públicas e da sociedade civil, visando apoiar a Administração Pública Estadual no desenvolvimento de estratégias e ações de monitoramento de SAFs fomentados por políticas públicas estaduais, bem como corroborar a formulação de normas para consolidar os SAFs como estratégia para recomposição florestal, incluindo Áreas de Preservação Permanente (APP) e Reservas Legais (RL). Nesse período, as principais contribuições técnicas da equipe da Embrapa Meio Ambiente ao Painel SAF foram:

- Discussões e subsídios técnicos para a elaboração da Minuta da Resolução SMA de Manejo de Espécies Nativas, que resultou na Resolução SMA nº 183, publicada em 12 de dezembro de 2018.
- Apoio à organização de eventos, como o workshop para avaliação econômica e financeira de SAFs da agricultura familiar (em junho de 2018) e os encontros de intercâmbio de projetos de SAFs do PDRS, reunindo agricultores e técnicos de diferentes regiões do estado.
- Contribuição ativa na elaboração de protocolos, organização e análise de dados de monitoramento econômico e biofísico (solo, biodiversidade, água) de um conjunto de SAFs acompanhados pela SMA, em São Paulo.
- Contribuição técnica para o desenvolvimento do kit KE-SAF, uma ferramenta pedagógica elaborada por pesquisadoras da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU) da USP, voltada ao desenho de SAFs junto aos agricultores familiares.
- Todas essas atividades foram e têm sido importantes para o avanço da política pública de apoio, fomento e regulamentação de SAFs no estado de São Paulo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em que pesem os benefícios ambientais e ecológicos dos SAFs e seu potencial de rentabilidade econômica, a ampliação de sua adoção e sua consolidação como alternativa de produção sustentável dependem de informações mais sistematizadas sobre as diversas experiências existentes, incluindo um maior conhecimento sobre seus aspectos econômicos e os serviços ambientais gerados. Igualmente se faz neces-

sário o desenvolvimento de inovações incrementais que otimizem sua rentabilidade, o avanço das políticas públicas de apoio e a ampliação do número de agentes multiplicadores capacitados.

Além do volume relativamente pequeno de pesquisas e de técnicos extensionistas que dominam a temática dos SAFs, a sua característica de cultivo de longo prazo e a complexidade inerente a esses sistemas acabam por demandar um esforço de pesquisa mais intenso do que para sistemas simplificados. Por outro lado, a forte necessidade de adequar o sistema às condições edafoclimáticas, ecológicas e socioculturais locais, aliada à grande diversidade de modelos, arranjos e desenhos que podem ser utilizados, justifica a necessidade de processos de caráter mais localizado, dirigidos a experiências concretas já desenvolvidas e praticadas por agricultores.

Nesse contexto desafiador para a pesquisa, a Embrapa Meio Ambiente, por meio da sua equipe técnica e de seus projetos, busca obter resultados que possam apoiar a adoção e o desenvolvimento desses sistemas na agricultura brasileira.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. F. C. S. de; PERIN, G.; POLICARPO, M. A.; SAMBUICHI, R. H. O **Programa de Aquisição de Alimentos (PAA): um caso de Big Push Ambiental para a sustentabilidade no Brasil**. Santiago de Chile: CEPAL, 2020.
- ASHLEY, R.; RUSSELL, D.; SWALLOW, B. The policy terrain in protected area landscapes: challenges for agroforestry in integrated landscape conservation. **Biodiversity and Conservation**, v. 15 p. 663-689, 2006. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10531-005-2100-x>.
- BHAGWAT, S. A.; WILLIS K. J.; BIRKS, H. J. B.; WHITTAKER, R. J. Agroforestry: a refuge for tropical biodiversity? **Trends in Ecology and Evolution**, v. 23, n. 5, p. 261-267, 2008.
- BUENO, E. A.; OLIVEIRA, L. V. F.; PASSOS, E. F. F.; MORICONI, W.; QUEIROGA, J. L. de. Efeito da cobertura do solo na retenção de umidade e produtividade olerícola em sistemas agroflorestais. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 14., 2020, Campinas. **Anais... Campinas: Embrapa Informática Agropecuária**, 2020. RE20402.p. 1-12.
- CABRAL C. M.; SANTOS, J. J.; QUEIROGA, J. L. de. ; BRAGA, K. S. M.; MORICONI, W. Levantamento florístico arbóreo de um sistema agroflorestal medicinal. XII Workshop de Plantas Medicinais, 12., 2016, Botucatu. **Plantas medicinais e suas fronteiras: tradição e tecnologia**. Botucatu: UNESP, 2016. 1p.
- CAMARERO, N. P.; OLIVEIRA, A. C. da S.; RAMOS-FILHO, L. O.; QUEIROGA, J. L. de; NEVES, M. C. Construção e socialização do conhecimento em agrofloresta: a experiência pedagógica de dia de campo na Embrapa Meio Ambiente. **Cadernos de Agroecologia**, v. 13, n. 2, 2018. 8 p. Edição dos Anais do 3º Seminário de Agroecologia da América do Sul, 2018.
- CAMARGO, R. A. L. de; RAMOS-FILHO, L. O.; CAMPOS, M. O. de; GONÇALVES, D. Implantação e acompanhamento de sistemas agroflorestais no assentamento Sepé Tiaraju/SP. **Revista Elo: Diálogos em Extensão, Viçosa**, v. 7, n. 2, p. 28-34, 2018.
- CANUTO, J. C.; RAMOS-FILHO, L. O.; URCHEI, M. A.; CAMARGO, R. C. R.; RAMOS, M. A. S. O uso de unidades de referência como ferramenta para a construção de sistemas agrícolas biodiversos para a agricultura familiar. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO, 10., 2014, Foz do Iguaçu. **Anais... Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Sistemas de Produção**, 2014. Ref. 232. 6 p.
- CANUTO, J. C. *et al.*. Implantação e acompanhamento de um sistema agroflorestal com cultivo diversificado. **Cadernos de Agroecologia**, v. 8, n. 2, 2013. Resumo 14264.
- CANUTO, J. *et al.* **Sistemas Agroflorestais: experiências e reflexões - Brasília, DF: Embrapa**, 2017. 216 p. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1074707>. Acesso em 19 abr. 2024.
- COSTA, C. C. de M.; TERRA, A. C. P. **Compras públicas: para além da economicidade**. Brasília, DF: ENAP, 2019. 135 p.
- DAINESE, M.; MARTIN, E. A.; AIZEN, M. A.; ALBRECHT, M.; BARTOMEUS, I.; BOMMARCO, R.; CARVALHEIRO, L. G.; CHAPLIN-KRAMER, R.; GAGIC, V.; GARIBALDI, L. A.; GHAZOUL, J.; GRAB, H.; JONSSON, M.; KARP, D. S.; KENNEDY, C. M.; KLEIJN, D.; KREMEN, C.; LANDIS, D. A.; LETOURNEAU, D. K.; MARINI, L.; POVEDA, K.; RADER, R.; SMITH, H. G.; TSCHARNTKE, T.; ANDERSSON, G. K. S.;

BADENHAUSSER, I.; BAENSCH, S.; BEZERRA, A. D. M.; BIANCHI, F.; BOREUX, V.; BRETAGNOLLE, V.; CABALLERO-LOPEZ, B.; CAVIGLIASSO, P.; CETKOVIC, A.; CHACOFF, N. P.; CLASSEN, A.; CUSSEY, S.; SILVA, F.; DE GROOT, G. A.; DUDENHOFFER, J. H.; EKROOS, J.; FIJEN, T.; FRANCK, P.; FREITAS, B. M.; GARRATT, M. P. D.; GRATTON, C.; HIPOLITO, J.; HOLZSCHUH, A.; HUNT, L.; IVERSON, A. L.; JHA, S.; KEASAR, T.; KIM, T. N.; KISHINEVSKY, M.; KLATT, B. K.; KLEIN, A. M.; KREWENKA, K. M.; KRISHNAN, S.; LARSEN, A. E.; LAVIGNE, C.; LIERE, H.; MAAS, B.; MALLINGER, R. E.; PACHON, E. M.; MARTINEZ-SALINAS, A.; MEEHAN, T. D.; MITCHELL, M. G. E.; MOLINA, G. A. R.; NESPER, M.; NILSSON, L.; O'ROURKE, M. E.; PETERS, M. K.; PLESCAS, M.; POTTS, S. G.; RAMOS, D. D.; ROSENHEIM, J. A.; RUNDLOF, M.; RUSCH, A.; SAEZ, A.; SCHEPER, J.; SCHLEUNING, M.; SCHMACK, J. M.; SCILIGO, A. R.; SEYMOUR, C.; STANLEY, D. A.; STEWART, R.; STOUT, J. C.; SUTTER, L.; TAKADA, M. B.; TAKI, H.; TAMBURINI, G.; TSCHUMI, M.; VIANA, B. F.; WESTPHAL, C.; WILLCOX, B. K.; WRATTEN, S. D.; YOSHIOKA, A.; ZARAGOZA-TRELLO, C.; ZHANG, W.; ZOU, Y.; STEFFAN-DEWENTER, I. A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science Advances*, v. 5, n. 10, eaax0121, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0121>.

FONTES, M. A.; MONTALVÁN RABANAL, J. E.; RAMOS FILHO, E. S. A roça do futuro: a construção da metodologia: de camponês a camponês no sul de Sergipe. *Geonordeste*, v. 24, n. 1, p. 102-127, 2013.

FREIRE, P. *Extensão ou comunicação?* 7.ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra. 1983. 93 p.

GALVÃO, A. C.; OLIVEIRA, P. F. C.; CAMARGO, R. C. R.; CANUTO, J. C.; CARRILLI, A. L.; ARAUJO, N. G. Promoção da sustentabilidade do meio rural da região de Franca/SP com a implantação de Unidades de Referência em Sistemas Agroflorestais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA, 7, 2011, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza, 2011.

GASTAL, M. L. Projeto Silvania: a prática da pesquisa/desenvolvimento em Goiás. In: ENCONTRO REGIONAL CENTRO-OESTE, 6., 1995, Brasília, DF. *Os (des) caminhos do desenvolvimento rural brasileiro: anais*. Brasília: APIPSA / UnB, 1997. p. 56-68.

GUIMARÃES, L. P.; SANDO, J. L.; RAMOS-FILHO, L. O.; BOVOY, A. L.; AMADOR, D. B. Articulação social em Rede: ações e propostas da Rede Agroflorestal da Região de Ribeirão Preto. In: SIMPÓSIO SOBRE REFORMA AGRÁRIA E QUESTÕES RURAIS, 9., 2020, Araraquara. *Anais Araraquara: UNIARA*, 2020.

HOCDÉ, H. *A lógica dos agricultores-experimentadores: o caso da América Central*. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1999. 36 p.

HOFFMANN, M. R. M. *Sistemas agroflorestais para agricultura familiar: análise econômica*. 2013. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

HURPIA, L. P.; QUEIROGA, J. L. de; SANTOS, R. A. Resposta da Alfaca em Sistema Agroflorestal irrigado por gotejamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 49., 2020, On-line. *Anais...* Campinas: SBEA, 2020.

IUNES, C. S. *Sistemas agroflorestais sucessoriais: avaliação financeira de um arranjo biodiverso voltado para a agricultura familiar*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de São Carlos. Araras.

JUNQUEIRA, A. H.; MORETTI, S. L. do A. Comunidade que Sustenta a Agricultura (CSA): tecnologia social de venda direta de alimentos e de revalorização das identidades alimentares territoriais. **Estudos Sociedade e Agricultura**, v. 26, n. 3, p. 517-538, 2018.

LIMA, A. C. V. de; CAMARGO, R. C. R. de; QUEIROGA, J. L. de; MALAGODI-BRAGA, K. S. O potencial dos sistemas agroflorestais agroecológicos e biodiversos para a conservação de abelhas nativas e a criação racional de abelhas-sem-ferrão. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 14., 2020, Campinas. **Anais...** Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2020a. RE20401. p. 1-12.

LIMA, L. T. M.; MAGALHÃES, T. M.; RAMOS-FILHO, L. O.; NEVES, M. C.; XAVIER, M. G. B.; ROSA, T. V.; HEMES, E.; GUIMARÃES, L. P.; MONTEZUMA, L. V.; SILVESTRE, B. R. Diversificação de cultivos e comercialização: apontamentos sobre geração de renda através de um grupo de consumo responsável. CONGRESSO LATINOAMERICANO DE AGROECOLOGIA, 8., 2020b, Montevideo. **Memórias...** Montevideo: Universidad de la República. Facultad de Agronomía. Departamento de Sistemas Ambientales, 2020. p. 845-850.

MAGALHÃES, T. M.; XAVIER, M. G. B.; MONTEZUMA, L. V.; RASSI, V. C.; RAMOS-FILHO, L. O. Avaliação da produção de biomassa por espécies adubadeiras arbóreas e gramíneas em um sistema agroflorestal. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 14., 2020, Campinas. **Anais...** Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2020. RE20410. p. 1-12

MAGALHÃES, T.; FILHO, L. O. R.; MORICONI, W.; MALAGODI-BRAGA, K. S.; QUEIROGA, J. L. de; NEVES, M. C. Processos participativos para a construção do conhecimento em agroflorestas: a experiência da Embrapa Meio Ambiente no diálogo de saberes. **Revista Retratos de Assentamentos**, v. 24, n. 1, p. 109-135, 2021.

MALAGODI-BRAGA, K. S.; RAMOS-FILHO, L. O.; QUEIROGA, J. L. de; CAMARGO, R. C. R. de; CORRALES, F. M. Estabelecimento de espécies frutíferas e nativas em um sistema agroflorestal biodiverso. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO, 10., 2014, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Sistemas de Produção, 2014. Ref. 91. 5 p.

MICHENER, C. D. **The bees of the world**. 2. ed. Baltimore: Johns Hopkins University, 2007. 953 p.

MINE, R. de O.; RAMOS-FILHO, L. O.; NEVES, M. C.; MORICONI, W.; MALAGODI-BRAGA, K. S. Uso de sistema de informação geográfica (SIG) para desenho e representação visual de sistemas agroflorestais. In: SIMPÓSIO SOBRE REFORMA AGRÁRIA E QUESTÕES RURAIS, 2018, Araraquara. **Terra, trabalho e lutas no século XXI: projetos em disputa: anais**. Araraquara: UNIARA, 2018. 10 p.

MONTEIRO, L. F.; PEIXOTO, L. N.; QUEIROGA, J. L. de; RAMOS-FILHO, L. O.; MARINHO-PRADO, J. S. Diversidade de insetos em horta de sistema agroflorestal. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 14., 2020, Campinas. **Anais...** Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2020. RE20404. p. 1-12.

MORICHITA, L. S. Y.; QUEIROGA, J. L. de; CABRAL, C. M.; CAMARGO, R. C. R.; MALAGODI-BRAGA, K. S.; RAMOS-FILHO, L. O.; MORICONI, W.; NEVES, M. C. O potencial medicinal de árvores nativas em sistemas agroflorestais biodiversos. **Revista Intellectus**, n. 44, v. 1, 2018.

NEVES, M. C.; MORICONI, W.; CANUTO, J. C.; CORRALES, F. M.; MALAGODI-BRAGA, K. S.; CAMARGO, R. C. R. de; QUEIROGA, J. L. de; RAMOS-FILHO, L. O.; URCHEI, M. A.; RAMOS, M. S. T. A.

S. O sítio agroecológico da Embrapa Meio Ambiente. In: URCHEI, M. A.; CANUTO, J. C. (ed.). **Trajatória das ações em agroecologia na Embrapa Meio Ambiente**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. cap. 5. p. 95-115.

NEVES, M. C.; MORICONI, W.; RAMOS-FILHO, L. O.; CANUTO, J. C.; URCHEI, M. A. Avaliação econômica da implantação e manutenção de um sistema agroflorestal com cultivo diversificado. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO, 10., 2014, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Sistemas de Produção, 2014. Ref. 260. 5 p.

NOBRE, H. G.; JUNQUEIRA, A. da C.; SOUZA, T. J. M.; RAMOS-FILHO, L. O.; CANUTO, J. C. Utilização de práticas agroecológicas na construção de projetos sustentáveis para a reforma agrária: um estudo de caso no assentamento Sepé Tiaraju-SP. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 7, n. 1, p. 3-13, 2012.

OLIVEIRA, P. F. C.; CAMARGO, R. C. R.; CANUTO, J. C.; GALVÃO, A. C.; ZAMIKHOWSKY, G. U.; CARRILLI, A. L. Estudo de caso em Unidade de Referência com Sistema Agroflorestal voltado à produção de hortaliças no Assentamento 17 de Abril em Restinga-SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA, 7., 2011, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2011.

OLIVEIRA, L. P. de; NEVES, M. C.; RAMOS-FILHO, L. O.; ROQUE, A. de A.; RAMOS, M. S. T. A. S.; QUEIROGA, J. L. de. Canais de comercialização da produção de um assentamento rural em transição agroecológica. In: JORNADA DE ESTUDOS EM ASSENTAMENTOS RURAIS, 8., 2017, Campinas. **Anais...** Campinas: FEAGRI/Unicamp, 2017. p. 1-10.

PEIXOTO, L. N.; MONTEIRO, L. F.; QUEIROGA, J. L. de; RAMOS-FILHO, L. O.; MARINHO-PRADO, J. S. Levantamento de entomofauna associada a culturas em sistemas agroflorestais. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 14., 2020, Campinas. **Anais...** Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2020. RE20415. p. 1-11.

PERUCHI, F.; ARAUJO, N.; CEZARETTI, E. S.; RODRIGUES FILHO, E. A.; RAMOS-FILHO, L. O.; GRACIA, M. E. PERUCHI, F.; ARAUJO, N.; CEZARETTI, E. S.; RODRIGUES FILHO, E. A.; RAMOS FILHO, L. O.; GRACIA, M. E. P. S. O uso de sistemas agroflorestais na recuperação de áreas protegidas e áreas degradadas: percepções do programa de desenvolvimento rural sustentável no estado de São Paulo - Brasil. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE AGROECOLOGÍA, 5., 2015, La Plata. **La Agroecología: n nuevo paradigma para redefinir la investigación, la educación y la extensión para una Agricultura Sustentable: memorias...** La Plata: Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología, 2015. 5 p.

QUEIROGA, J. L. de; JUNQUEIRA, A. C.; AVILA, P. C.; CANUTO, J. C.; URCHEI, M. A.; MALAGOLI-BRAGA, K. S. Monitoramento em agroflorestas: adequação de metodologias para a avaliação da sustentabilidade. **Cadernos de Agroecologia**, v. 8, n. 2, resumo 15155, 2013. 5 p.

QUEIROGA, J. L. de; RAMOS-FILHO, L. O.; SILVA, L.; RAMOS, M. S. T. A. S.; CORRALES, F. M. Agrofloresta: sistematização de experiências e principais gargalos enfrentados por agricultores assentados da reforma agrária do estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO SOBRE REFORMA AGRÁRIA E QUESTÕES RURAIS, 8., 2018, Araraquara. Terra, trabalho e lutas no século XXI: projetos em disputa. **Anais...** Araraquara: UNIARA, 2018. 15 p.

RAMOS-FILHO, L. O. **Reforma agrária y transición agroecológica en una zona de grandes monocultivos de caña de azúcar: el caso del Asentamiento Sepé Tiaraju, región de Ribeirão Preto, Brazil**. 2013. 381 f. Tesis Doctoral - Universidad de Córdoba, Córdoba.

RAMOS-FILHO, L. O.; NEVES, M. C.; PIRES, H. L. M.; MORICONI, W.; QUEIROGA, J. L. de; CABRAL, C. M.; SIQUEIRA, M. F. R. Monitoramento e análise do uso de mão de obra em sistemas agroflorestais agroecológicos: um estudo de caso em assentamento rural da região de Ribeirão Preto, Brasil. In: JORNADAS INTERDISCIPLINARIAS DE ESTUDIOS AGRARIOS Y AGROINDUSTRIALES ARGENTINOS Y LATINOAMERICANOS, 10., Buenos Aires, 2017. *Anales...* Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 2017. 20 p.

SARAIVA, E. B.; SILVA, A. P. F. da; SOUSA, A. A. de; CERQUEIRA, G. F.; CHAGS, C. M. dos S.; TORAL, N. Panorama da compra de alimentos da agricultura familiar para o Programa Nacional de Alimentação Escolar. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 18, n. 4, p. 927-935, 2013.

SCHMITT, C. J. Redes, atores e desenvolvimento rural: perspectivas na construção de uma abordagem relacional. *Sociologias*, v. 13, n. 27, p. 82-112, 2011.

SOUSA, T. de J. M.; NOBRE, H. G.; LE MOAL, M.; CANUTO, J. C.; JUNQUEIRA, A. da C.; RAMOS-FILHO, L. O. Construyendo el conocimiento agroecologico en asentamientos de la reforma agraria en la busqueda por la consolidación de un nuevo modelo de producción en el Estado de São Paulo, Brasil. Symposium Innovation and Sustainable Development in Agriculture and Food - ISDA, 2010, Montpellier, France. *Proceedings...* Montpellier: Cirad: Inra, SupAgro, 2010. 10 p.

SOUZA, A. C. C. de; SOARES JUNIOR, D.; LIBERAL, E. G.; MIRANDA, G. M.; PASSINI, J. J.; MIRANDA, M. *Redes de referências para a agricultura familiar*: apresentação do enfoque de trabalho através de descrições de propriedades acompanhadas. Londrina: SEAB: EMATER: IAPAR, 2000. 78 p.

THIOLLENT, M. *Metodologia da pesquisa-ação*. 16. ed. São Paulo: Cortez, 2008. (Coleção temas básicos de pesquisa-ação). 132 p.

UENO, V. A.; NEVES, M. C.; QUEIROGA, J. L. de; RAMOS-FILHO, L. O.; OLIVEIRA, L. P. de. Estratégias de comercialização da agricultura familiar: estudos de caso em assentamentos rurais do estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO SOBRE REFORMA AGRÁRIA E QUESTÕES RURAIS, 7., 2016, Araraquara. **30 anos de assentamentos na Nova República**: qual agricultura e qual sociedade queremos? anais. Araraquara: UNIARA, 2016. 14 p.

URCHEI, M. A.; CANUTO, J. C. *Trajetória das ações em agroecologia na Embrapa Meio Ambiente*. Embrapa Meio Ambiente, 2017. 175 p. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1098600>.

VOLTOLINI, L. C.; MERCADANTE, M. E. G.; RAMOS-FILHO, L. O.; MORICONI, W.; QUEIROGA, J. L. de. Uso da água em sistemas agroflorestais: uma breve revisão da literatura. *Cadernos de Agroecologia*, v. 13, p. 1-10, n. 2, 2018.



# PRODUÇÃO INTEGRADA DE MORANGO (PIMo) COMO MODELO DE IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL

*Fagoni Fayer Calegario, Sandro Eduardo Marschhausen Pereira, Valéria Sucena Hammes, Claudio César de Almeida Buschinelli, Janaína Paula Marques Tanure, Marcelo Augusto Boechat Morandi, Kátia Sampaio Malagodi-Braga, Elisangeles Baptista de Souza e Augusto Guerreiro Fontoura Costa*

## INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar a produção integrada como um sistema de produção sustentável e certificável, que requer forte embasamento técnico-científico para sua implementação, e, como política pública do governo brasileiro, o Programa Produção Integrada Agropecuária (PI-Brasil), capitaneado pelo então Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento<sup>1</sup> (Mapa).

A Embrapa Meio Ambiente tem, desde 2006, atuação definitiva para desenvolver uma sequência de ações e ferramentas que levaram à organização, implementação, certificação e manutenção do sistema, tendo como modelo a Produção Integrada de Morango (PIMo) na região de Atibaia e Jarinu, SP. Como um dos resultados dessa política pública, a PIMo hoje permite reconhecer o morango como produto *premium* nesses municípios.

Atravessando uma fase de desmobilização nacional do programa de Produção Integrada, escolhendo como modelo uma cultura desafiadora do ponto de vista fitossanitário, naquele momento estigmatizada pela presença de resíduos de agrotóxicos acima do limite aceitável nos produtos, e cultivada em uma região de plantio decadente, a equipe criou metodologias e ferramentas, e teve sucesso em liderar os agricultores à certificação e à manutenção do Programa de forma independente. A implementação e certificação da PIMo em São Paulo se tornou um caso de sucesso de sucesso no Brasil.

---

<sup>1</sup> Em 2023, o Mapa foi renomeado como Ministério da Agricultura e Pecuária.

Os tópicos deste capítulo apresentarão a sequência de ações realizadas para organização e implementação do Programa de Produção Integrada de Morango na região de Atibaia e Jarinu, SP, relatando as contribuições técnicas e ferramentas produzidas pela Embrapa Meio Ambiente, atualmente empregadas para a implementação de Programas de Produção Integrada de outros produtos em várias regiões do país. A Figura 5.1 apresenta os principais marcos temporais do programa PIMO e as contribuições da Embrapa Meio Ambiente, que serão detalhadas ao longo desse capítulo.

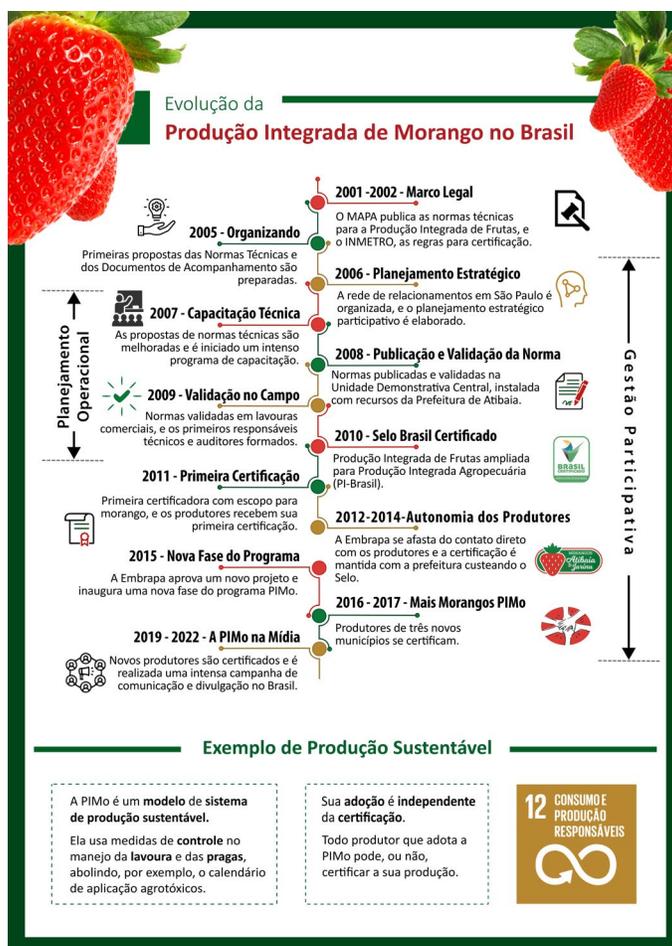


Figura 5.1. Principais marcos temporais do Programa de Produção Integrada de Morango em São Paulo (PIMO-SP).

## ANTECEDENTES DA PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS NA EMBRAPA MEIO AMBIENTE

As atividades de pesquisa e transferência de tecnologias relacionadas à Produção Integrada de Frutas têm um longo histórico na Unidade, remontando ao final da década de 1990. As questões emergentes sobre qualidade ambiental no campo, e, principalmente, dos produtos destinados ao mercado externo, foram as aglutinadoras de um grupo de pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente, juntamente a outras Unidades da Embrapa, Universidades, Agências de Desenvolvimento Estaduais e Federais, e Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa), que trabalharam na elaboração dos primeiros projetos de pesquisa da Unidade sobre o tema.

Esse grupo atuou intensamente na busca de soluções tecnológicas para os problemas que promovem baixa qualidade dos produtos agrícolas e impactos no meio ambiente, seja pela inadequação das técnicas de manejo ou pela falta de informação do produtor.

Projetos de pesquisa interdisciplinares foram criados, avaliando polos de produção de frutas, em distintos biomas, que buscavam certificação de seus produtos pelos protocolos internacionais de boas práticas agrícolas (Embrapa Meio Ambiente 1999a; 1999b; 1999c; 1999d; Lopes et al., 2000; Silva et al., 2000).

Estudos, dias de campo e capacitações envolvendo técnicas para diagnósticos, monitoramento de parâmetros ambientais e manejo integrado de pragas foram desenvolvidos na região do Submédio São Francisco no nordeste brasileiro (Silva, 1997; Pessoa et al., 2001a, Pessoa et al., 2001b; Silva et al., 2001), auxiliando associações de produtores e empresas na obtenção de safras seguras e confiáveis do ponto de vista da qualidade. Os resultados desse grande esforço foram entregues ao Mapa em 2001, contribuindo com informações técnicas e científicas para a elaboração de políticas públicas.

As bases normativas da Produção Integrada haviam sido publicadas pelo Mapa (Andrigueto; Kososki, 2002) e pelo Inmetro (2002), e os projetos de pesquisa e desenvolvimento passaram a atuar pontualmente, seja atendendo temas de maior demanda do setor, como dinâmica ambiental e análise de resíduos de agrotóxicos (Chaim et al., 2004; Ferracini; Pessoa, 2008) e atividades de capacitação (Buschinelli; Calegario, 2009; Buschinelli et al., 2014), seja abordando um produto específico, como é o caso da Produção Integrada de Morango (Calegario et al., 2014b).

### **Escolha da Produção Integrada de Morango (PIMo) como modelo desafiador de implementação**

O sucesso econômico – e, conseqüentemente, social – no setor produtivo do morango sempre esteve intimamente ligado aos desafios fitossanitários enfrentados pela

cultura. A título de exemplo, em junho de 2004, cerca de 100 produtores de morango do Vale do Caí, tradicional região produtora do Rio Grande do Sul, receberam pesadas multas por utilizarem em suas propriedades agrotóxicos não registrados para a cultura (Agrolink, 2004; Conjur, 2004). Esse episódio, que envolveu o Ministério Público Federal, motivou o SEBRAE-RS a buscar apoio técnico da Embrapa Uva e Vinho (Bento Gonçalves, RS), atuante na Produção Integrada de Maçã, para orientar a adoção de boas práticas agrícolas e a conversão para um sistema de produção seguro e sustentável. Os problemas do Vale do Caí também aconteciam em outras regiões produtoras do país, e, no final do mesmo ano, foram iniciados os três primeiros projetos de Produção Integrada de Morango no Brasil, financiados pelo Mapa, com repasse de recursos pelo CNPq.

No início desses primeiros projetos de Produção Integrada de Morango, aprovados no final de 2004, as equipes identificaram e reuniram os principais agentes de instituições de ensino, pesquisa e extensão envolvidos com a cultura do morango, formaram grupos e iniciaram a organização das informações para elaborar o sistema de produção na forma escrita.

As principais orientações técnicas, baseadas nos fundamentos científicos existentes, começaram a ser registradas para servir como guia para que o setor produtivo atendesse à legislação e adotasse boas práticas agrícolas (BPA) no campo e boas práticas de fabricação (BPF) nas casas de embalagem (Bortolozzo et al., 2007).

Ao mesmo tempo em que as informações iam sendo organizadas, as equipes discutiam para elencar e identificar, nas regiões de âmbito do projeto, os produtores líderes e formadores de opinião, assim como associações ou sindicatos de produtores mais ativos, além dos gestores públicos que tivessem condições de apoiar os grupos na conversão do sistema de produção vigente, que apresentava uma série de falhas, para um sistema de produção mais seguro e sustentável.

A estrutura das normas técnicas e dos documentos de acompanhamento da produção integrada de maçã (Protas; Valdebenito-Sanhueza, 2002), e as Diretrizes e Normas Gerais da Produção Integrada de Frutas (PIF) (Andrigueto; Kososki, 2002), serviram como base para os primeiros rascunhos do que seriam, futuramente, as normas técnicas da PIMO.

As equipes dos projetos PIMO, que, no início, se concentravam nos Estados do Espírito Santo, sul de Minas Gerais e Rio Grande do Sul, sempre mantiveram contato e trocas de informação entre si, com o objetivo de chegar a uma proposta de norma única, que regulamentasse as diretrizes específicas para a Produção Integrada de Morango (PIMO) aplicadas a todas as regiões produtoras do Brasil.

O estado de São Paulo teve grande importância para o início do desenvolvimento da cultura do morango no Brasil, tanto em termos de produção científica quanto no cultivo comercial (Calegario et al., 2008). A região de Atibaia e Jarinu, SP, chegou a

ser a maior produtora de morangos do país. No entanto, houve grande queda na área plantada e na qualidade de vida dos agricultores da região, devido a problemas fitossanitários (que também geraram inserções na mídia relacionadas à contaminação no morango por agrotóxicos e rejeição dos consumidores), alta incidência de doenças decorrentes da pressão de inóculo, dificuldades econômicas oriundas do alto valor das terras e da mão-de-obra, intensa especulação imobiliária, e dificuldade de se obter mudas de boa qualidade e trabalhadores qualificados. Diante desses desafios, no ano de 2006, a cultura do morango em Atibaia e região foi escolhida como modelo de implementação de um programa de Produção Integrada de Morango. Um dos projetos financiados pelo Mapa foi ampliado para São Paulo e, com a coordenação da Embrapa Meio Ambiente, em parceria com a Prefeitura da Estância de Atibaia e a Associação de Produtores de Morango e Hortifrutigranjeiros de Atibaia, Jarinu e Região, houve o início da construção do Programa PIMo-SP.

## Organização da rede de relacionamentos

A organização da rede de relacionamentos foi a base do sucesso no estabelecimento do Programa PIMo-SP, que, realizada seguindo as recomendações da Macroeconomia Ambiental (Hammes, 2012), sugeriu a reunião de atores que representassem o poder público, o setor privado e a sociedade civil, e que tivessem envolvimento com a produção de morango. Dessa forma, os produtores conseguiram iniciar e manter a produção sustentável, porque identificaram e reuniram diversas instituições que passaram a compartilhar a responsabilidade pelo sucesso do Programa PIMo-SP. Tais instituições representavam: organizações de produtores; institutos de pesquisa; entidades corporativas voltadas a ensino e treinamento profissional; empresas de extensão rural; gestores públicos; empresas privadas fornecedoras de insumos e serviços; e empresas ligadas ao comércio e à distribuição do morango. Assim, a organização dessa rede permitiu direcionar os esforços individuais e coletivos para o planejamento anual da produção, contribuindo para o delineamento das normas técnicas do sistema de produção integrada de morango, e para o sucesso de todos. Três tipos de relacionamentos foram estabelecidos nessa rede: 1) parceria – relação permanente de compromisso para delineamento da política pública; 2) apoio – relação eventual para qualificação técnica e científica do sistema de produção proposto; e 3) patrocínio – relação eventual para viabilização de atividades programadas (Tabela 5.1), de maneira que os principais atores na elaboração participativa dessa política pública foram os produtores, o governo local, a assistência técnica, a Embrapa Meio Ambiente e o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa).

Tabela 5.1. Rede de relacionamentos do Programa de Produção Integrada de Morango em São Paulo (PIMO-SP).

Parcerias	Gestores públicos	Mapa; Prefeitura da Estância de Atibaia.
	Organizações de produtores	Associação dos Produtores de Morango e Hortifrutigranjeiros de Atibaia, Jarinu e Região.
	Institutos de pesquisa	Embrapa Meio Ambiente.
Apoio	Gestores públicos	Prefeitura de Jarinu.
	Organizações de produtores	Sindicato Rural.
	Institutos de pesquisa	Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA); Instituto Agrônômico de Campinas (IAC); Instituto Biológico (IB); Centro Universitário Padre Anchieta; Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP); Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper); Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais (IFSULDEMINAS); Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro); Universidade do Vale do Sapucaí (UNIVÁS); Universidade Paulista de Campinas (UNICAMP); Embrapa Uva e Vinho; Embrapa Clima Temperado; e Embrapa Gado de Leite.
	Extensão Rural	Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI); Instituto de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER); consultores privados.
	Compra e distribuição de alimentos	Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo (CEAGESP); Redes privadas de distribuição (Oba, NK).
	Fornecedores de insumos e serviços	Agrosafety <sup>1</sup> ; IGEAgro Consultoria <sup>1</sup> ; PROMIP <sup>1</sup> - Manejo Integrado de Pragas; Laboratório Atena; produtores de mudas.
	Entidades corporativas de treinamento profissional	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE); Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR); Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza.
	Patrocínio	Agências de fomento
Fornecedores de produtos e serviços		Revendas de insumos.

Notas: <sup>1</sup>Empresas incubadas na EsalqTec (Incubadora de empresas) no início do Programa PIMO-SP.

Essa união permitiu que a Prefeitura de Atibaia promovesse políticas locais com base nas demandas e necessidades reais dos produtores, alicerçada em pesquisa e em política pública federal. Além disso, viabilizou a participação de muitos colaboradores, que se reuniram, garantindo o apoio dos técnicos especializados na produção de morango, para a obtenção de resultados extraordinários.

A visão sistêmica proporcionada pela Macroeducação (Calegario, 2013) permitiu a elaboração de um processo de planejamento estratégico participativo de construção de um futuro sustentável, promovendo o comprometimento dos produtores na execução correta das práticas da produção integrada, antes mesmo das normas técnicas específicas para a cultura do morango terem sido publicadas, e, inclusive, contribuindo para a continuidade dos estudos e o aprimoramento da política pública ao longo dos anos.

## Planejamento Estratégico Participativo

O planejamento estratégico participativo foi realizado em duas fases, a partir do diagnóstico Ver-Julgar-Agir, de Hammes (2012). Com isso, foi possível utilizar o mínimo de recursos locais para viabilizar o máximo de participação de todos nas atividades de contextualização da região, priorização da capacitação gradativa dos produtores e dos técnicos envolvidos a partir das demandas identificadas na produção de alimento seguro, disseminação do conhecimento na forma de política pública, e no processo de acompanhamento e avaliação anual.

Na primeira fase (Tabela 5.2) foi desenvolvida a visão sistêmica sobre a realidade local, realizada em quatro etapas trimestrais: 1ª) Ver I – diagnóstico do entorno das propriedades, ou seja, a microrregião (Calegario et al., 2006a; Calegario et al., 2006b); 2ª) Ver 2 – diagnóstico da propriedade rural (Hammes et al., 2006; Calegario et al., 2006c); 3ª) Julgar – identificação dos principais motivos para a escolha da cultura, bem como dos riscos e problemas da produção (Calegario et al., 2006d); e 4ª) Agir – identificação das soluções para combater os riscos e os problemas, base para a estruturação do Programa PIMo-SP (Hammes et al., 2007). O processo de Ver-Julgar-Agir habilitou os participantes a avaliarem a base existente para a construção das normas técnicas, segundo um entendimento conceitual nivelado entre os mesmos, e a elaborar uma proposta de adequação viável à realidade dos integrantes da cadeia produtiva do morango.

Na segunda fase (Tabela 5.3) foram desenvolvidos os mecanismos locais para a elaboração da norma, contando com a instalação da Unidade Demonstrativa Central do Programa PIMo-SP, realizada com recursos do Orçamento Participativo, conquistado pela comunidade rural local.

O planejamento estratégico participativo elaborado nos anos de 2006 e 2007 (Hammes et al., 2006; Hammes et al., 2007) foi facilitado pela existência de um convê-

nio prévio entre a Prefeitura de Atibaia e a Embrapa Meio Ambiente (Atibaia, 2003) para o desenvolvimento agroambiental do município (Tabela 5.2). As ações para cumprir os objetivos e as metas estabelecidas no planejamento estratégico participativo foram realizadas de 2006 a 2011, ano da primeira certificação (Tabela 5.3).

**Tabela 5.2.** Fase 1 do planejamento estratégico participativo: Planejamento do Programa PIMo-SP.

Ano	Ações
2003	Estabelecimento de convênio da Prefeitura de Atibaia e a Embrapa para o desenvolvimento de atividades na área de interesse agroambiental (Atibaia, 2003).
2006	Sensibilização em educação ambiental; diagnóstico Ver-Julgar-Agir; tomada de decisão de adesão à PIMo.
2007	Elaboração das normas no âmbito nacional (NTE-PIMo); Capacitação técnica em PIMo; Tentativa de validação em propriedades de produtores.

**Tabela 5.3.** Fase 2 do planejamento estratégico participativo: Estruturando a Produção Integrada de Morango (PIMo).

Ano	Ações
2008	Publicação das normas técnicas específicas da Produção Integrada de Morango (NTE-PIMo) (IN 14, de 1 de abril de 2008) (Brasil, 2008a); primeira validação da norma na Unidade Demonstrativa (UD) Central da PIMo; recursos do Orçamento Participativo de Atibaia (R\$ 112,63mil <sup>1</sup> ); auditoria não oficial (interna).
2009	Segunda validação; recursos do Orçamento Participativo de Atibaia (R\$ 85,08mil <sup>1</sup> ); recursos Embrapa; Unidade Demonstrativa Central, mais 10 unidades demonstrativas em lavouras comerciais; apoio da Extensão Rural (CATI); séria ocorrência de problema fitossanitário, conhecido como “vermelhão”, em todas as lavouras de morango do país.
2010	Terceira validação; recursos do Orçamento Participativo de Atibaia (R\$ 61,17mil <sup>1</sup> ); publicação complementar da NTE-PIMo (IN 24, de 4 de agosto de 2010) (BRASIL, 2010a); publicação pelo Mapa da IN 27, de 30 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010c), ampliação da PIF para a Produção Integrada Agropecuária (PI-Brasil); impedimento da certificação por falta de certificadora acreditada no Inmetro.
2011	Quarta validação; sem recursos do Orçamento Participativo de Atibaia; primeira certificação do Brasil (selo Brasil Certificado usado na safra de 2012); Bônus Certificação SEBRAE.

Notas: <sup>1</sup>Valor corrigido pelo IPCA (IBGE) com base no período de janeiro do ano citado a janeiro de 2022. Base utilizada: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAO/publico/corrigirPorIndice.do?method=corrigirPorIndice>.

Após a certificação, de 2011 a 2014, a Embrapa Meio Ambiente afastou-se da atuação direta e da condução do programa. Com isso, foi possível verificar a continuidade da adoção da PIMo sem a intervenção direta da Embrapa e independente da execução de projetos (Tabela 5.4). Os produtores tiveram sucesso na manutenção da certificação, e, em 2015, solicitaram novo apoio da Embrapa para reciclagem de treinamentos e para dar suporte à recertificação na região de Atibaia e Jarinu.

**Tabela 5.4.** Período de autonomia do programa PIMo-SP em relação à Embrapa.

2012	Primeiro ano de utilização do selo Brasil Certificado; formação da Comissão Técnica da PIMo (CT-PIMo) (15 de maio de 2012), com envio da composição da Comissão para o Mapa.
2013/14	Formalização da CT-PIMo, com a publicação da Portaria nº 114, de 27 de junho de 2013 pelo Mapa no Diário Oficial da União (BRASIL, 2013); Certificação: vigência de 3 anos; auditorias anuais de manutenção, afastamento da Embrapa (sem renovação de projeto) como estratégia de testar a apropriação da tecnologia.

O período de 2006 a 2014, resumido nas Tabelas 5.1 a 5.4, define, portanto, a primeira fase do programa PIMo-SP, com foco nas ações de definição metodológica, implementação, validação e organização da rede de relacionamentos, com destaque para 2011, ano da certificação do primeiro grupo de produtores deste Programa.

## Novo projeto da PIMo-SP e a expansão do Programa

Em atenção à demanda dos produtores, em 2015 a Embrapa aprovou um novo projeto voltado para ações de transferência de tecnologia, inaugurando uma nova fase do programa, de manutenção da certificação (Tabela 5.5). As ações desenvolvidas tiveram o objetivo de apoiar os processos de adoção e certificação e divulgar o Selo Brasil Certificado, visando que mais agentes de comercialização e consumidores tivessem conhecimento destes.

Com o retorno ao programa, a Embrapa incorporou a prática de realizar reuniões estratégicas trimestrais na rotina dos produtores e técnicos participantes do Programa PIMo-SP, conseguindo fortalecer a organização dos produtores, reaproximar os parceiros locais e difundir a produção integrada para novos interessados na sua adoção, inclusive para aqueles oriundos de outras regiões produtoras do Brasil.

Todas essas ações tiveram impacto positivo significativo. Em 2017, houve a certificação de um pequeno produtor da cidade de Piedade, SP, que se uniu ao grupo certificado da Associação de Produtores de Morango e Hortifrutigranjeiros de Atibaia, Jarinu e Região. Ainda naquele ano, houve a certificação de dois grandes produtores do Rio Grande do Sul, com produção na casa de 1.000 toneladas/ano, e, em 2019, a

certificação de uma produtora de médio porte do Paraná (Tabela 5.5). A proatividade e a maturidade do grupo PIMO-SP foi fator importante na expansão e consolidação do Programa em outros estados, como é o caso dos produtores do sul, que, desde antes da obtenção da certificação, mantêm comunicação com o grupo de São Paulo para troca de experiências e fortalecimento da rede e da marca.

Em 2016, um grupo de seis pequenos produtores de Alfredo Vasconcelos, MG, também havia obtido a certificação (Tabela 5.5), mas, no ano seguinte, optou por não manter o selo por não verificarem vantagens comerciais como a agregação de valor e consequente diferenciação de preço do produto. Esse fato impulsionou a coordenação dos programas PIMO-SP e PI-Brasil a focarem esforços na elaboração de formas de divulgar o programa para os consumidores e outros atores da cadeia produtiva, com apoio de um Termo de Execução Descentralizada (TED). Minas Gerais é, atualmente, o maior produtor nacional de morangos, e ainda não possui nenhum produtor com direito a uso do Selo Brasil Certificado.

**Tabela 5.5.** Manutenção da certificação do programa PIMO de 2015 a 2022 (Alfredo Vasconcelos, MG).

Ano	Ações de divulgação, expansão da adoção e fortalecimento da rede
2015	Embrapa aprova novo projeto e inaugura uma nova fase do Programa PIMO.
2016	Certificação de grupo de seis produtores em Alfredo Vasconcelos, MG.
2017	Certificação de produtor de Piedade, SP. Certificação de dois grandes produtores de Santa Lúcia do Piaí, RS.
2018	Atualização da CT-PIMO, com a publicação da Portaria nº 3.690, de 30 de outubro de 2018 (Brasil, 2018).
2019	Lançamento do primeiro vídeo de divulgação do morango Brasil Certificado (Embrapa, 2019). Certificação de produtora de médio porte de Pinhalão, PR. Aporte financeiro do Mapa, por meio de Termo de Execução Descentralizada (TED), para ações de divulgação e fortalecimento da rede.
2020	Pandemia COVID-19: Ações estratégicas realizadas de forma adaptada (remota ou híbrida).
2021	Lançamento da Campanha do Morango Brasil Certificado em uma live (Embrapa, 2021a), realizada em 29 de abril de 2021, com quatro vídeos curtos lançados, um por semana, durante o mês de maio (Embrapa, 2021b, 2021c, 2021d, 2021e). Atualização das NTE-PIMO (Brasil, 2021).
2022	Lançamento da primeira animação sobre a PI-Brasil (Embrapa, 2022), com destaque para o morango. Realização da <i>live</i> Morango Brasil Certificado (Instituto Certifica, 2022). Lançamento, pelo Mapa, de diversas peças de divulgação (cartilhas, animações) referentes a seis culturas agrícolas, dentre elas o morango, destinadas a produtores, varejistas, técnicos e consumidores (Brasil, 2022a).

De 2019 a 2022, a partir de aporte financeiro do Mapa, e com o aumento do volume de morangos certificados garantido pelas empresas do sul, foram realizadas novas ações de comunicação e divulgação da PIMo (vídeos, animações e *lives*), com o objetivo de divulgar o Selo Brasil Certificado e de fortalecer a rede de relacionamentos do Programa PIMo. Em 2022 o próprio Mapa fez o lançamento de diversas peças de divulgação voltadas à sensibilização de produtores, técnicos, varejistas e consumidores (Tabela 5.5), em uma ação extremamente importante, a partir da qual esperava-se tornar o programa PI-Brasil conhecido nacionalmente.

Durante o período mais grave da Pandemia de Covid-19 (2020–2021), as reuniões e ações estratégicas tiveram que ser adaptadas, o que fez com que alguns assuntos fossem tratados de forma virtual nas reuniões do Conselho Municipal de Desenvolvimento Rural (CMDR) de Atibaia. Devido às restrições impostas pela pandemia, foram iniciados os processos de assistência técnica e auditoria remotas ou híbridas, o que acabou contribuindo para diminuir os custos de deslocamento dos profissionais e facilitando o acompanhamento das lavouras e dos cadernos de campo pelos responsáveis técnicos.

Assim, a base do sucesso do Programa PIMo-SP foi o estabelecimento de uma forte rede de relacionamentos, o planejamento estratégico, a gestão participativa, e – como veremos a seguir – a construção da norma concomitante à validação no campo, com auditorias internas desde o início da implementação.

## Elaboração das normas técnicas e dos documentos de acompanhamento

Tendo descrito a construção do Programa PIMo-SP, agora voltaremos no tempo para explicar, com detalhes, como se deu a elaboração das normas técnicas e dos documentos de acompanhamento e, no próximo item, a validação do sistema no campo, a publicação das normas e a certificação.

Após a ampliação de um dos projetos PIMo para o estado de São Paulo em 2006, os membros da rede de relacionamentos formada (Tabela 5.1) começaram a contribuir intensamente para a redação da proposta de norma técnica, bem como dos documentos de acompanhamento (caderno de campo, caderno de pós-colheita, grade de agrotóxicos e lista de verificação).

A implementação técnica da PIMo-SP contou com três frentes de trabalho, conduzidas concomitantemente: a) Elaboração de Normas Técnicas Específicas e Documentos de Acompanhamento da PIMo; b) Capacitação do grupo de produtores e técnicos; e c) Validação do sistema no campo (Calegario et al., 2007).

A partir dos rascunhos do sistema de produção, as Normas Técnicas Específicas (NTE-PIMo) foram elaboradas em âmbito nacional, com discussão entre representantes das principais regiões produtoras de morango do Brasil entre os anos de 2006 e 2007 (Calegario et al., 2007).

A lógica da elaboração de normas técnicas específicas é sempre partir das diretrizes e normas gerais da produção integrada e analisar, à luz das orientações técnico-científicas vigentes, quais são os procedimentos mais importantes para a proteção do ambiente, dos trabalhadores rurais e dos consumidores. Os fatores diretamente relacionados à segurança do alimento (no sentido de inocuidade – *food safety*) são os critérios críticos para se determinar os procedimentos obrigatórios e proibidos. No entanto, é necessário que o setor produtivo analise cada item proposto, verificando a viabilidade de atendimento às normas no campo a partir da realidade do cultivo. Por isso, as etapas de debate entre academia, técnicos e agricultores são de extrema importância para a elaboração de uma norma técnica factível.

Assim sendo, diversas reuniões técnicas e oficinas foram realizadas para elaboração, discussão e análise da proposta de NTE-PIMo, sempre com presença obrigatória do setor produtivo. Calegario et al. (2010a) publicaram uma lista com o nome e a data de diversos eventos realizados com essa finalidade.

Com a proposta de norma minimamente finalizada, o documento foi distribuído em eventos, como o X Seminário Brasileiro de Produção Integrada de Frutas, realizado em Bento Gonçalves, em 2007, para que pesquisadores e técnicos de diversas áreas pudessem revisar os itens das diferentes áreas temáticas e propor ajustes. A edição dos ajustes foi realizada, e a versão final depositada no Mapa.

### **Validação do sistema no campo, publicação da norma técnica e certificação**

No início de 2007, foram iniciadas as primeiras tentativas de validação do sistema no campo (Tabela 5.2). Como descreve Abreu et al. (2007), agricultores dos municípios de Atibaia, Jarinu e Jundiá (SP) e um engenheiro agrônomo de Imbituva (PR) iniciaram a introdução das boas práticas nas lavouras de morango, cultivando um total de 2.718.200 plantas naquele ano, sendo 422.700 em sistema de produção integrada.

Ao mesmo tempo, foram oferecidas capacitações nos principais temas relevantes do sistema de produção integrada. Calegario et al. (2007) descrevem 11 eventos, realizados para planejamento e treinamento sobre adoção da PIMo. A proposta de norma, ainda em elaboração naquele período, foi usada como base para orientação dos produtores no campo e nas aulas, atentando-se principalmente para o uso de produtos fitosanitários que constavam na Grade de Agrotóxicos registrados para a cultura do morango e para a adoção de boas práticas agrícolas. A coordenação do Programa orientou os produtores e técnicos a arquivarem todos os certificados para que fossem apresentados como evidências objetivas de treinamentos obrigatórios em futuras auditorias.

A primeira dificuldade enfrentada pelos produtores foi a necessidade de registrar os procedimentos nos cadernos de campo. Abreu et al. (2007) propuseram, então, um Diário de Campo, composto pelos dados de cadastro dos produtores e uma pá-

gina para cada mês, semelhante a um calendário de parede, em que se registravam os procedimentos realizados no espaço referente a cada dia. Embora simples, essa ferramenta foi o primeiro grande passo para a posterior evolução para o registro em cadernos de campo mais complexos.

O receio da perda de produção por problemas fitossanitários e a falta de produtos (tanto químicos quanto biológicos) registrados suficientes para equacionar esses problemas também foram grandes gargalos para a adoção do novo sistema pelos produtores. Entretanto, a questão que mais dificultou a implementação nas lavouras comerciais em 2007 foi a falta de profissionais de assistência técnica e extensão rural que pudessem orientar e acompanhar todos os produtores que, naquele momento, se mostraram interessados em aderir à PIMo. Abreu et al. (2007) evidenciaram que apenas dois dos 15 participantes nesse ano contavam com engenheiros agrônomos como responsáveis técnicos. Grande parte das orientações recebidas pelos produtores, naquela época, vinha de vendedores de produtos agropecuários (47%), e o restante (40%) não recebia nenhuma assistência técnica sequer. Sem assistência técnica especializada, a falta de orientação e acompanhamento das lavouras foi o principal limitante para a implementação da PIMo na primeira tentativa.

No ano seguinte (2008), entretanto, ocorreram os primeiros grandes marcos da PIMo no Brasil. Em abril, a primeira versão das Normas Técnicas Específicas da Produção Integrada de Morango (NTE-PIMo) foram publicadas pelo Mapa no Diário Oficial da União, como Instrução Normativa Mapa nº 14, de 1 de abril de 2008 (Brasil, 2008a) (Tabela 5.3). Dois anos mais tarde, foi complementada pela Instrução Normativa nº 24, de 04 de agosto de 2010 (Brasil, 2010a). Essas normativas foram usadas até 2021, quando a atualização da norma foi publicada na forma de Instrução Normativa nº 17, de 22 de dezembro de 2021 (Brasil, 2021) (Tabela 5.5), revogando as duas Instruções Normativas anteriores.

Voltando aos marcos do ano de 2008, por iniciativa da Prefeitura de Atibaia e da Associação de Produtores, o Programa PIMo foi escolhido, por votação popular, para receber recursos do Orçamento Participativo (OP) da Prefeitura de Atibaia (Tabela 5.3). Com esses recursos, a primeira Unidade Demonstrativa (UD Central) da PIMo foi instalada na Sede da Associação dos Produtores, no Parque Duílio Maziero (Parque do Morango), divisa entre Atibaia e Jarinu (SP). Com a escassez de profissionais especializados, os esforços de assistência e acompanhamento técnico foram concentrados na UD Central, sendo o então Secretário da Agricultura de Atibaia o engenheiro agrônomo responsável.

Ainda em 2008, a UD Central começou a ser utilizada também como ponto de treinamentos práticos e divulgação da PIMo para consumidores, como os turistas que visitaram o primeiro Colha e Pague de morangos da região (Calegario; Salustio, 2009), e produtores adotantes e não adotantes. Alternativas simples e econômicas, como a

casa de embalagem de placas recicláveis (Rosente et al., 2009), e o diário de campo, usado para desenvolver o hábito de registrar os procedimentos – base da rastreabilidade (Abreu et al., 2007) –, foram divulgadas e levadas como exemplo para outras propriedades e regiões.

Experimentos instalados na UD Central para determinação da estratégia de monitoramento para o manejo de ácaro rajado (*Tetranychus urticae* Koch) resultaram no início da produção de várias publicações orientando o controle desta praga-chave da cultura (Calegario et al., 2014a; Iwassaki, 2010; Iwassaki et al., 2008; Iwassaki et al., 2009a, 2009b, 2014). Ainda em 2008, foram instalados experimentos na UD Central que revelaram que a polinização teria condições de ser melhorada a fim de garantir a produção de morangos de tamanho e formato perfeitos, resultando em maior satisfação dos consumidores e lucro para o produtor (Malagodi-Braga; Calegario, 2008). Desde então, os participantes foram orientados a realizar o monitoramento e, se necessário, o enriquecimento do ambiente com abelhas para aumento da quantidade e qualidade da produção.

Ao mesmo tempo em que o sistema foi validado pela primeira vez na UD Central (Tabela 5.3), gerando inúmeras informações, os participantes foram capacitados e passaram a adotar procedimentos da PIMO em suas áreas de produção. Mesmo com todos os resultados positivos, a falta de responsáveis técnicos com habilitação limitava a expansão da validação para as áreas de produção comercial, e a falta de auditores treinados (Brasil, 2003) passou a impossibilitar a certificação oficial, de terceira parte, da UD Central.

Para apoiar a resolução desses problemas, em 2009 a Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI) reforçou a equipe do Programa com a participação de um engenheiro agrônomo do município de Atibaia e outro de Jarinu, que apoiaram os produtores na adoção da PIMO em suas lavouras. A Embrapa Meio Ambiente, por sua vez, realizou o primeiro curso teórico-prático de Formação de Responsáveis Técnicos e Auditores da PIMO, com carga horária de 40 horas e ementa cobrindo todas as Áreas Temáticas das NTE (Tabela 5.3), capacitando os dois tipos de profissionais exigidos para a certificação oficial, de terceira parte: o responsável técnico (RT) e o auditor. Nesse ano ocorreu a segunda validação no campo, tanto na UD Central, ainda com recursos do OP, como em dez unidades demonstrativas instaladas em lavouras comerciais. Apesar do esforço conjunto de todos os parceiros, a safra de 2009 foi seriamente comprometida pela ocorrência de um problema fitossanitário novo, conhecido como “vermelhão” (Tabela 5.3), pouco estudado, que provocou a morte severa de uma grande quantidade de plantas em lavouras de todo país, cultivadas sob todos os sistemas de produção (integrada, convencional e orgânica). Nos anos seguintes, a Embrapa Meio Ambiente realizou alguns experimentos acerca do “vermelhão”, cujos resultados foram publicados por Kmit (2010) e Kmit et al. (2011).

Pelo terceiro ano consecutivo, em 2010, a Prefeitura de Atibaia injetou recursos do OP para manutenção da UD Central (Tabela 5.3), enquanto, nas lavouras comerciais, os produtores continuavam a conversão paulatina do sistema convencional para o sistema de Produção Integrada.

Desde os primeiros anos foram realizadas auditorias internas (de primeira parte), em que o próprio produtor, responsável técnico ou grupo de produtores avaliava a adoção dos requisitos da PIMo, verificando possíveis não-conformidades que necessitassem de ações corretivas. Esse tipo de verificação foi feito até mesmo antes da publicação oficial das normas técnicas, permitindo, além da conferência da adoção dos procedimentos propostos, o norteamento da finalização da construção das NTE-PIMo (Vicentini et al., 2008). Após a publicação oficial das normas (Brasil, 2008a), as auditorias internas continuaram sendo feitas com a finalidade de verificar o estado de adoção dos procedimentos (Calegario et al., 2010c). Com o objetivo de avaliar a facilidade de adoção dos diferentes itens da norma e a performance dos adotantes, Calegario et al. (2010b) propuseram um questionário, que se mostrou muito útil para: a) indicar os temas com maior necessidade de treinamentos; b) avaliar a efetividade do Programa PIMo ao longo dos anos de adoção; e c) apontar quais pontos poderiam ameaçar a obtenção da certificação.

Em uma das auditorias internas, realizada na UD Central, foi possível detectar uma falha em um dos itens da norma, que foi corrigido pela publicação complementar na forma de Instrução Normativa nº 24, de 4 de agosto de 2010 (Brasil, 2010a) (Tabela 5.3).

Infelizmente, apesar de a UD Central e seis lavouras comerciais estarem em condições de receber a auditoria externa (oficial) na safra 2010, não foi possível realizá-la, porque o grupo da PIMo-SP, ao tentar contratar uma certificadora, surpreendeu-se com o fato de não existir nenhum Organismo de Avaliação da Conformidade (OAC, ou certificadora) acreditada no Inmetro, conforme exigia a Portaria Inmetro (Inmetro, 2002).

Ainda no ano de 2010, a Produção Integrada de Frutas (PIF) foi ampliada para Produção Integrada Agropecuária (PI-Brasil), pela publicação da Instrução Normativa nº 27, de 30 de agosto de 2010, do Mapa (Brasil, 2010c) (Tabela 5.3).

No ano de 2011 ocorreu o segundo grande marco da PIMo no Brasil. Completando a quarta validação na UD Central e em mais cinco Unidades Demonstrativas, instaladas em áreas comerciais (Tabela 5.3), finalmente o grupo da PIMo-SP pôde contratar uma certificadora acreditada no Inmetro, que realizou a primeira auditoria externa oficial em todas as propriedades, conferindo autorização para os seis produtores utilizarem o Selo Brasil Certificado. Para essa auditoria, o SEBRAE nacional contribuiu com o Bônus Certificação.

## O Manejo Integrado de Pragas (MIP) como figura central da Produção Integrada

O morango é uma fruta com mercado em crescente expansão e com grande apelo junto ao consumidor por suas características organolépticas e nutricionais. Entretanto, é uma cultura que pode ser afetada por vários patógenos e pragas, que provocam danos irreparáveis quando não controlados adequadamente e limitam a sua exploração comercial (Costa; Ventura, 2004). Essa característica, muitas vezes aliada ao manejo inadequado da produção, por muito tempo levou ao uso excessivo de agrotóxicos na cultura do morangueiro no Brasil, o que fez com que o morango constasse na lista de produtos com irregularidades de resíduos do Programa de Análise de Resíduos de Agrotóxicos em Alimentos (PARA), da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (2013). Frutas produzidas sem o uso de agrotóxicos, como é o caso das orgânicas, ou portadoras de selos que garantem que tais substâncias foram utilizadas adequadamente e que o sistema produtivo preserva o meio ambiente, como é o caso da Produção Integrada, são uma necessidade do mercado, tanto o nacional como o de exportação, e demanda de um consumidor, cada vez mais exigente e consciente, por produtos alimentícios seguros e produzidos de forma mais sustentável.

A Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO) define Manejo Integrado de Pragas (MIP) como o sistema de manejo de pragas que associa o ambiente e a dinâmica populacional da espécie, utiliza todas as técnicas apropriadas e métodos de forma tão compatível quanto possível, e mantém a população da praga em níveis abaixo daqueles capazes de causar dano econômico. Para uma boa prática do MIP, deve-se reconhecer a importância da biologia e da ecologia não só da espécie-alvo, mas também de seus inimigos naturais e das comunidades nos diferentes nichos do agroecossistema. O manejo da produção deve ser gerenciado sob uma ótica primordial de dinâmica de populações e controle natural, apenas utilizando medidas de controle quando realmente necessário. Assim, o princípio do MIP é otimizar o controle, e não o maximizar (Paula Júnior et al., 2005). Nesse contexto, o MIP estabelece o uso de medidas de controle com base em informações ecológicas obtidas no agroecossistema, abolindo, por exemplo, as aplicações fixas de agrotóxicos por meio de calendários. Para o desenvolvimento e a implementação do MIP, são necessárias três etapas básicas: (1) avaliação do agroecossistema, (2) tomada de decisão baseada na biologia, ecologia e dinâmica da cultura e de suas pragas, e (3) seleção dos métodos de controle a serem adotados. O Programa tem como principais ferramentas de trabalho: exploração do controle biológico natural, favorecendo a presença de inimigos naturais na área; monitoramento da população de insetos, pragas e doenças; entendimento da tolerância das plantas aos danos das pragas; uso de controle biológico de pragas e doenças (Morandi et al., 2014); e utilização de controle químico somente quando o ataque à lavoura atinge

o nível de dano econômico (Paula Júnior et al., 2016). No Brasil, o MIP é mais difundido em cultivos de frutas, como banana, goiaba, citros e manga para exportação, pois a técnica é uma das exigências de boas práticas agrícolas nos países importadores.

Em se tratando de morango, os consumidores brasileiros conhecem basicamente dois tipos de produtos disponíveis no mercado: morangos da produção convencional e morangos orgânicos. Na busca por sustentabilidade, a Produção Integrada de Morango está situada no caminho de conversão da Produção Convencional (PC) para a Produção Orgânica (PO). Nesse contexto, o MIP é considerado o “coração” do sistema de Produção Integrada (PI), justamente por ser a base técnica para redução e racionalização da utilização de agrotóxicos durante o cultivo.

Morangos convencionais são obtidos pelos processos tradicionais de cultivo, em que a utilização de agrotóxicos é permitida. Muitos produtores convencionais adotam boas práticas agrícolas e seguem a legislação. No entanto, por não adotarem um sistema de certificação, não fica evidente para os consumidores a diferenciação entre morangos convencionais produzidos cuidadosamente e aqueles que não foram obtidos sob os mesmos cuidados. A produção orgânica, por sua vez, não permite a utilização de nenhum tipo de agrotóxico sintético no cultivo, o que garante que, caso todas as normas sejam seguidas corretamente, não serão detectados resíduos de agrotóxicos no produto final. Já a PI encontra-se entre esses dois modelos de produção (Figura 5.2) (Calegario, 2016), em que é permitido o uso de agrotóxicos, mas dentro de critérios rigorosos de registro para as culturas e sendo utilizado de forma disciplinada, dentro das recomendações agronômicas, e como último recurso para o controle de pragas e doenças, seguindo o conceito do MIP (Paula Júnior et al., 2016).



**Figura 5.2.** PIMo situada no caminho de conversão da PC em PO, sendo o MIP o coração do sistema de Produção Integrada, por se tratar da base técnica para a redução do uso de agrotóxicos na cultura. A seta indica a direção para a sustentabilidade.

Fonte: Calegario (2016).

Na PC, os produtores costumam seguir um calendário de aplicação de agrotóxicos, em que muitas aplicações preventivas são motivadas pelo receio do ataque de pragas, mesmo que não haja danos econômicos à lavoura. Nesses casos, é comum que as aplicações sejam semanais ou quinzenais, independentemente da ocorrência das pragas, podendo chegar a mais de 40 em uma mesma safra. O produtor convencional opta pela aplicação – muitas vezes desnecessária – de agrotóxicos para não correr o risco de perder o investimento que fez na lavoura, que é relativamente alto para o morangueiro. As plantas são bastante suscetíveis a pragas, e as condições climáticas ótimas para a planta geralmente são as mesmas que favorecem o desenvolvimento destas.

Já na PI, as práticas utilizadas têm o objetivo de garantir o equilíbrio fisiológico e nutricional do morangueiro. As adubações observam obrigatoriamente as recomendações feitas com base em análises de solo. As variedades são escolhidas de acordo com sua aptidão climática e resistência a problemas fitossanitários. A rotação de área é obrigatória, visando manter o cultivo em locais onde haja sempre a menor pressão de inóculo possível. Grande investimento de recursos é feito no treinamento de produtores, colaboradores e técnicos com o objetivo de subsidiar uma tomada de decisão baseada em princípios de boas práticas, sustentabilidade do sistema produtivo e redução de impactos durante o processo de produção. Considerando todo esse conjunto de medidas, que tem por base o MIP, a PIMo confere às plantas um maior nível de resistência a pragas e doenças, sem depender do uso indiscriminado de agrotóxicos, a partir de um sistema de produção mais sustentável e que garante alto nível de inocuidade e segurança ao alimento (*food safety*).

## **Polinização como garantia de qualidade e produtividade do morangueiro**

Diversos são os fatores pré-colheita que podem impactar a qualidade e a produtividade do morangueiro em diferentes sistemas de produção e cultivo. Visando garantir um padrão mínimo de qualidade aos consumidores dos morangos com selo do Programa de Produção Integrada (PI-Brasil), Martinho e colaboradores (2006) identificaram, no maior mercado atacadista do Brasil, a Ceagesp, as principais características do morango consideradas positivas e negativas pelos compradores. Dentre elas, destacaram-se como positivas: a coloração vermelha, o sabor e a doçura, o tamanho grande e o formato característico. E, como negativas, o morango sobremaduro, o imaturo, as deformações e as podridões, e doenças pós-colheita (Martinho et al., 2006). Esses mesmos autores concluíram que, além das questões relacionadas ao ponto de colheita, à coloração e ao teor de açúcar e acidez, há a necessidade de uma classificação mensurável, pela Produção Integrada de Morango (PIMo), inserida em seu caderno de pós-colheita, para a tolerância aos defeitos mais citados. Isso porque a PI-Brasil tem como um de seus principais objetivos a oferta de alimentos seguros e

de qualidade, mas também porque o valor monetário das frutas, além de formado pela relação entre a oferta e a demanda, depende de suas características qualitativas (Folegatti et al., 2006).

Já se sabe que o manejo adequado da cultura na fase pré-colheita, como preparo do solo, adubação, irrigação, manejo integrado de pragas e doenças, dentre outras boas práticas, reflete diretamente na qualidade da fruta e na produtividade do morangueiro. Entretanto, existe um fator pré-colheita diretamente relacionado ao crescimento e ao formato dos morangos: a polinização, que frequentemente não é considerada parte integrante do manejo da cultura, embora exerça um impacto direto na qualidade e produtividade do morangueiro. Como contribuição da pesquisa realizada pela Embrapa Meio Ambiente, esse fator pré-colheita foi considerado nas normas técnicas específicas da PIMo desde 2008 (Brasil, 2008a; Brasil, 2021), e o conhecimento sobre a polinização como um fator de produção na cultura do morango encontra-se ora sistematizado (Malagodi-Braga, 2018). Além disso, o tema da polinização está presente nas capacitações de agricultores e técnicos, e em cursos de formação de responsáveis técnicos e auditores da PIMo, realizados pela Embrapa Meio Ambiente.

A etapa da reprodução das plantas com flores é essencial para a agricultura quando a fecundação é necessária para o crescimento da polpa da fruta ou de um legume. Nessas plantas, será o embrião, formado pela fecundação no interior de cada semente, que irá estimular o crescimento da polpa, através da produção de substâncias reguladoras de crescimento. Na agricultura, esse aspecto do crescimento natural da polpa torna-se ainda mais importante em plantas cujas flores possuem muitos óvulos a serem fecundados, como no caso do morangueiro. Isso porque a polinização inadequada dessas flores pode resultar em um acúmulo de sementes sem embrião, ocasionando uma deformação na fruta ou no legume devido ao não crescimento da polpa naquele local. Para diferenciar as deformações resultantes de falhas na polinização de outras causas, é importante notar que frutas e legumes deformados, quando no ponto de colheita, apresentarão o mesmo padrão de consistência, cor e brilho que aqueles que estiverem bem formados. No morangueiro, essas características permitem diferenciar a deformação causada pelo percevejo *Neopamera bilobata* daquela ocasionada por falhas na polinização (Malagodi-Braga, 2018; Botton et al., 2017).

Assim, em diversos sistemas de cultivo, a obtenção de morangos bem formados, com maior massa fresca, coloração vermelha mais intensa, mais firmes, e com maior vida útil comercial (tempo de prateleira), dependerá da polinização da maioria dos pistilos e da distribuição uniforme do pólen pelo miolo da flor (Chagnon et al., 1989; Zebrowska, 1998; Malagodi-Braga; Kleinert, 2004; Antunes et al., 2007; Witter et al., 2012; Klatt et al., 2014). Como mencionado acima, algumas dessas características foram consideradas bastante relevantes por compradores no mercado atacadista de morango (Martinho et al., 2006).

Embora as cultivares comerciais de morangueiro sejam autoférteis e suas flores hermafroditas, na maioria delas a autopolinização espontânea e a autopolinização pelo vento não serão capazes de polinizar adequadamente suas flores, particularmente aquelas de maior porte, primárias e secundárias, que originam os morangos de tamanho grande. Isso ocorre porque as flores com potencial para resultar em morangos de maior calibre apresentam o maior número de pistilos (Crane; Walker, 1984) o que as torna, em geral, mais dependentes da polinização por abelhas (Connor; Martin, 1973; Chagnon et al., 1989; Zebrowska, 1998; Malagodi-Braga, 2018; Barbosa; Orth, 2020).

As abelhas, além de realizarem a polinização cruzada, aumentam a taxa de autopolinização. Estudos revelaram que diferentes espécies de abelhas podem apresentar comportamentos diversos nas flores, complementando a polinização umas das outras, garantindo uma maior taxa de fecundação e melhores resultados para a produção (Chagnon et al., 1993; Malagodi-Braga; Kleinert, 2007). Vale destacar que, mesmo que o fruto apresente o formato padrão, sem uma deformação aparente, ele poderá não ter atingido seu potencial de crescimento por não estar completamente polinizado (Malagodi-Braga, 2010). Como os morangos são comercializados por peso (masa fresca), sem uma taxa de polinização que se aproxime de cem por cento, mesmo aplicando-se outras boas práticas de manejo, o retorno econômico será inferior ao potencial da cultura.

O diagnóstico da ocorrência de falhas na polinização deve ser feito pela observação do sintoma característico, conforme proposto por Malagodi-Braga (2018). Além disso, alterações na tabela de Controle de Recepção dos Morangos, do caderno de pós-colheita da PI-Brasil (Brasil, 2022b), foram recentemente propostas pela Embrapa Meio Ambiente, visando facilitar o monitoramento da qualidade dos morangos e contemplar, de forma explícita, as deformações resultantes por falhas na polinização (Monitorando, 2022).

Portanto, para garantir uma boa polinização na cultura do morango, em campo aberto ou sob cultivo protegido, deve-se favorecer a abundância e a diversidade das abelhas nativas na lavoura. Para isso, é essencial cuidar da qualidade ambiental da propriedade rural, mantendo e recuperando a vegetação nativa, seja em áreas de preservação permanente e reserva legal, exigidas por lei, seja através do estabelecimento de sistemas agroflorestais biodiversos. Isso porque essas áreas, em geral, através da oferta abundante e diversificada de alimento e abrigo, poderão manter diferentes populações de abelhas, além de outros polinizadores, nas proximidades das lavouras de morango. De acordo com as normas técnicas específicas da PIMO, essa questão deve ser contemplada tanto no aspecto educativo (item 2.6) quanto operacional (item 4.1) (Brasil, 2021).

Além disso, a produção de morangos em estufas completamente fechadas exigirá, para diversas cultivares, como Oso Grande e San Andreas, o manejo intencional de

colônias de abelhas. Isso porque, ao reduzir a ação do vento e a presença de polinizadores, a porcentagem de morangos deformados será altíssima ao longo de toda safra, inviabilizando a produção comercial. O manejo de abelhas em estufas fechadas exigirá cuidados com a manutenção e o bem-estar das colônias, e, conseqüentemente, trará o sucesso na polinização. No Brasil, as abelhas-sem-ferrão (*Meliponini*) tem se revelado uma opção importante para aumentar a taxa de polinização do morangueiro através do manejo de colmeias nas áreas de produção, em campo aberto e no cultivo protegido (Malagodi-Braga; Kleinert, 2004; Malagodi-Braga, 2010; Witter et al., 2012). Essa preocupação com a polinização de culturas agrícolas vem crescendo mundialmente diante da crise climática e de biodiversidade, que inclui a perda de polinizadores, e, portanto, a manutenção e a restauração da vegetação nativa são ações essenciais para minimizar seus impactos em qualquer sistema de produção e cultivo.

### **Plano de Gestão Ambiental na Produção Integrada de Morango (PGA – PIMo)**

A Instrução Normativa Mapa nº 17, de 22 de dezembro de 2021, estabelece as necessidades de atendimento do produtor para obtenção da certificação PIMo. Dentre as exigências, na *Área Temática 4 - Recursos Naturais*, é obrigatório “organizar a atividade do sistema produtivo respeitando suas funções ecológicas, de forma a promover o desenvolvimento sustentável, no contexto da PIMo, seguindo o Plano de Gestão Ambiental, assim como a execução de medidas previstas”, sendo recomendada a “conservação do ecossistema na propriedade, seja a campo ou em estufas” (Brasil, 2021). Tais princípios estão dentro da essência do planejamento ambiental da produção.

A vocação produtiva de um território ou local depende de fatores climáticos, do relevo, dos solos, dentre outros, que englobam os chamados recursos naturais, bem como de fatores sociais e econômicos que, por seu turno, podem influir na adoção de tecnologias de manejo produtivo e conservação ambiental. Assim sendo, torna-se fundamental o planejamento da produção seguindo tal vocação para a continuidade do negócio empreendido, ou, em outras palavras, para a sustentabilidade da propriedade rural e seu entorno.

A Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) de atividades rurais atende perfeitamente tais anseios, sendo definida por Rodrigues (1998) como “um conjunto de procedimentos desenvolvidos sob a égide científica da Ecologia, com o intuito de permitir a previsão, a análise e a mitigação dos efeitos ambientais de projetos, planos e políticas de desenvolvimento, que impliquem em alteração da qualidade ambiental”. O objetivo é auxiliar os produtores, técnicos e gestores na tomada de decisão quanto às melhorias a serem adotadas para diminuir os impactos ambientais negativos decorrentes da atividade produtiva.

Nesse sentido, e atendendo demandas do setor produtivo de morango, atividades de pesquisa (Calegario et al., 2010b; Pastrello et al., 2009; Buschinelli et al., 2007; Buschinelli et al., 2009) e inúmeras capacitações envolvendo metodologias de avaliação de desempenho socioambiental foram realizadas na região de Atibaia e Jarinu, em São Paulo, contribuindo para a elaboração da metodologia apresentada a seguir.

Foi desenvolvida uma ferramenta (Buschinelli et al., 2016) tendo como base metodológica o Sistema Ambitec-Agro (Rodrigues et al., 2003), combinado às Normas Técnicas Específicas da PIMO. Essa ferramenta foi utilizada para realizar as avaliações dos produtores e a elaboração de Planos de Gestão Ambiental, obrigatórios para obtenção da certificação PIMO.

Foram realizados cursos e capacitações de produtores e técnicos de agências de desenvolvimento rural, para preparação das avaliações de campo com produtores parceiros da Embrapa e que buscavam a certificação. Seis produtores de morango foram selecionados na região de Atibaia e Jarinu, e avaliados segundo a metodologia mencionada nas safras de 2011 e 2012.

Os resultados obtidos, concretizados em um Relatório Técnico do Plano de Gestão Ambiental da Produção Integrada de Morango, e entregues a cada produtor, abordam os impactos positivos e negativos das práticas usadas e as recomendações de melhoria no manejo e tratamento do sistema produtivo como um todo, integrando indicadores numéricos de desempenho socioambiental. De maneira integrada, as Normas Técnicas Específicas da PIMO foram inseridas em planilhas eletrônicas para preparação dos produtores para a auditoria no processo de certificação.

Em comparação com as práticas produtivas convencionais de morango, adotadas antes da introdução da PIMO, todos os produtores apresentaram valores positivos de desempenho ambiental na avaliação pelo Sistema Ambitec-Agro – Módulo PIMO, com destaque para a redução no uso de agrotóxicos, que foram em grande parte substituídos por métodos de manejo integrado de pragas, além do sistemático registro de todas as atividades no caderno de campo, garantindo planejamento e rastreabilidade da produção.

A maioria dos produtores apresentou não conformidades relacionadas aos temas Nutrição da planta e Irrigação. Vale destacar que todos os produtores foram certificados na safra 2011–2012, e receberam o Selo Brasil Certificado, chancelado pelo Mapa e pelo Inmetro.

## **O papel da PIMO na inclusão do morango como Cultura com Suporte Fitossanitário Insuficiente (CSFI)**

Conforme mencionado anteriormente, a contaminação no morango por agrotóxicos não registrados ou acima do LMR já gerou inserções de notícias negativas na mídia e, conseqüente, rejeição do produto pelos consumidores.

O Programa de Análise de Resíduos de Agrotóxicos – PARA – foi criado em 2001 pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), visando avaliar os níveis de resíduos de agrotóxicos nos alimentos de origem vegetal no comércio. Dentre nove alimentos selecionados para iniciar o monitoramento, o morango foi um dos amostrados por apresentar os critérios preconizados, incluindo o alto consumo anual per capita, em Kg, e a disponibilidade no comércio dos diferentes estados engajados no Programa (Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2008).

No período de 2001 a 2010, foram analisadas 982 amostras de morango, e em 39,6% foram encontradas irregularidades, que compreendiam uso de produtos não autorizados e/ou resíduos acima do limite permitido (Fraga, 2020). Além do Programa PARA, da Anvisa, em 2008, o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento também instituiu o Plano Nacional de Controle de Resíduos e Contaminantes em Produtos de Origem Vegetal (PNCRC/Vegetal), que monitora a ocorrência de resíduos de agrotóxicos e contaminantes químicos e biológicos nos produtos destinados ao mercado interno e à exportação com coletas no campo (Brasil, 2008b). Além da Anvisa e do Mapa, também há estados que possuem programas próprios de monitoramento.

Nos monitoramentos realizados, os casos de presença de agrotóxicos não autorizados para as culturas poderiam ser decorrentes da ausência de agrotóxicos registrados para manejo de pragas das culturas. Essa ausência muitas vezes ocasiona o desvio de uso, ou seja, aplicação de agrotóxicos registrados para algumas culturas, mas não para aquela em questão. Além das conseqüentes irregularidades, essa situação também dificulta o exercício do profissional de assistência técnica, que não tem como prescrever legalmente um agrotóxico não registrado.

Pelas irregularidades constatadas em 2008, um evento na Embrapa Meio Ambiente reuniu pesquisadores e técnicos de vários institutos, empresas e universidades, públicas e privadas, com o objetivo de discutir propostas para regulamentar o uso de agrotóxicos para a inclusão de pequenas culturas, denominadas Culturas de Suporte Fitossanitário Insuficiente (CSFI), ou aquelas para as quais falta ou há número reduzido de agrotóxicos registrados, popularmente conhecidas como *Minor Crops*, como a cultura do morango (Lima, 2008). As propostas desse fórum subsidiaram, na ocasião, a Consulta Pública de uma normativa.

Em 2010, reconhecendo as dificuldades e visando favorecer o uso seguro e regulamentado de agrotóxicos, foi publicada a Instrução Normativa Conjunta (INC) nº 1, de 23 de fevereiro de 2010 (Brasil, 2010b), com a coparticipação do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), e do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama). Posteriormente, essa IN foi revogada pela INC nº 1, de 16 de junho de 2014, que apresenta pequenas alterações nos procedimentos (Brasil, 2014; Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2015; Souza, 2019).

O propósito da INC nº 1/2014 é incentivar o registro para pequenas culturas, simplificando as etapas do processo. A apresentação de parecer técnico passou a atender as exigências de estudos de eficiência agrônômica; as culturas passaram a ser organizadas em grupos e subgrupos; e os estudos de Limites Máximos de Resíduos (LMR) passaram a ser realizados para a cultura representativa do subgrupo, e extrapolados para suas demais culturas (Souza, 2019).

A publicação da INC nº 1/2014 trouxe a possibilidade de avanços, mas também desafios, decorrentes do grande volume de demandas e da diversidade de culturas solicitadas para atendimento, o que dificultou o trabalho para priorização de quais culturas trabalhar e que ingredientes ativos seriam os mais seguros e eficientes.

A cultura do morango foi selecionada para iniciar esse processo em razão de ser uma das que apresentava maior número de amostras com irregularidades nos resultados das análises de resíduos de agrotóxicos, além de possuir embasamento técnico-científico graças ao Programa de Produção Integrada.

A partir da problemática apresentada, tiveram início debates sobre o tema. Em 2010, em uma primeira iniciativa, a Embrapa Meio Ambiente promoveu, por meio do Fórum Permanente para Adequação Fitossanitária, a discussão “Como a nova legislação afetará a cultura do morango”, com participação e integração de pesquisadores, produtores e profissionais de referência de instituições públicas e privadas com interesse na cultura. Nessa oportunidade, os órgãos registrantes Mapa, Anvisa e Ibama apresentaram a nova legislação e suas implicações para a cultura. No evento, foram também expostos os desafios para a Produção Integrada de Morango, pela Embrapa Meio Ambiente, e a realidade dos produtores com relação aos agrotóxicos, pela Associação dos Produtores de Morango e Hortifrutigranjeiros de Atibaia, Jarinu e Região (Embrapa Meio Ambiente, 2010).

No ano de 2012, os órgãos reguladores identificaram a necessidade de consultar pesquisadores de referência na cultura oriundos da Embrapa, Instituto Biológico de Campinas, Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper) e Universidade Federal do Paraná (UFPR), para auxiliarem na seleção de ingredientes ativos com potencial para inclusão na grade de agrotóxicos do morango, a fim de incrementar as possibilidades de manejo da resistência de pragas e para posteriormente articular junto às indústrias, com o intuito de identificar o interesse e a possibilidade de inclusão desses ingredientes ativos relacionados à cultura do morango em registro de produtos formulados comerciais.

Dentre as demandas de produtos apresentadas, o grupo fez a priorização eliminando, inicialmente, todos os produtos que poderiam ser substituídos por Boas Práticas Agrícolas e os produtos com alto impacto no ambiente ou na saúde humana. Também foram identificados produtos que teriam eficácia de controle das pragas-chaves da cultura ou com ausência de produtos autorizados, visando disponibilizar

ferramentas de manejo para os produtores. Os produtos finais indicados também pertenciam a grupos químicos diferentes, visando ao manejo da resistência.

Em 2018, foi criado o Comitê *Minor Crops* Brasil, uma “força-tarefa”, de iniciativa do Setor Produtivo, que agrega as instituições que representam pesquisa, indústria (agroquímicos e produtos biológicos) e governo. Esse Comitê tem como objetivo discutir e elaborar estratégias de levantamento de demandas das *Minor Crops*, almejando a busca e a disponibilização de soluções para melhorar o manejo e o controle de pragas, contribuindo, portanto, para a produção de alimentos com qualidade e segurança para os consumidores.

A realização desses debates e levantamentos de demandas tem grande importância para que sejam viabilizadas mais opções de recomendação feitas pelos profissionais aos produtores, para que estes manajem as suas produções com eficiência e garantam segurança para o meio ambiente, para o aplicador e para o consumidor final.

A norma trouxe como benefício o maior envolvimento da cadeia produtiva na busca de soluções para o problema. Após oito anos da publicação da Instrução Normativa Conjunta Mapa, Anvisa e Ibama nº 1/2014 (Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2015), que incentivou o registro para as pequenas culturas, o morango foi uma das beneficiadas.

Atualmente são 43 ingredientes ativos autorizados para a cultura, de diferentes modos de ação (Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2020), totalizando 116 produtos formulados registrados para uso pelo Mapa até dezembro de 2021, sendo 43 inseticidas e 73 fungicidas (Brasil, 2003), um avanço extremamente significativo quando se compara com a pequena grade de agrotóxicos registrados para a cultura em 2008, ano de publicação da primeira norma técnica da PIMo.

## Ferramentas de implementação, divulgação e incentivo da produção integrada

Ao longo do desenvolvimento do Programa PIMo-SP, visando facilitar a implementação, a validação, a manutenção, a divulgação e o incentivo à produção integrada, diversas ferramentas foram sendo criadas pela equipe da Embrapa e seus parceiros.

Além do **diário de campo** (Abreu et al., 2007), já mencionado, que auxiliou os produtores a adquirirem o hábito de preencher os registros necessários, em todas as safras, mesmo antes da certificação oficial, foram realizadas **auditorias internas**, visando avaliar a conformidade na implementação, validação e manutenção da PIMo (Vicentini et al. 2008; Calegario et al., 2010c). Essas auditorias se mostraram extremamente úteis para avaliar a situação dos produtores novos, que foram se unindo ao grupo ao longo dos anos, e planejar as ações corretivas necessárias. Também ajudaram a levantar eventuais não conformidades nos estabelecimentos dos produtores já

certificados, permitindo adoção de ações corretivas antes da realização da auditoria de certificação. Metodologia semelhante, de **auditorias explicativas ou didáticas**, foi utilizada nos treinamentos teórico-práticos para formação de responsáveis técnicos e auditores. Na parte prática das formações, foram usadas auditorias explicativas e **auditorias simuladas** para que os participantes pudessem ter a experiência de acompanhar auditorias exatamente no modelo das externas, promovidas por certificadoras de terceira parte. Além de parceiros oriundos de diversas instituições de pesquisa, ensino e extensão, vários auditores profissionais e os próprios produtores e técnicos do grupo de Atibaia atuaram como instrutores nesses treinamentos.

Visando monitorar a adoção do protocolo da PIMo no campo e avaliar o nível de dificuldade na adoção das normas na percepção de produtores e técnicos, um questionário foi criado com escores (F = fácil; M = médio; D = difícil) para cada procedimento (Calegario et al., 2010b). Para facilitar a visualização da situação do grupo em cada safra, a média dos escores era transformada em cores (F = verde; M = amarelo; e D = vermelho), e organizada de acordo com a época de adoção das práticas na cultura do morango, produzindo-se um **calendário colorido**. Assim, os produtores e técnicos podiam ficar sempre alerta com relação às fases mais desafiadoras no ciclo da cultura (que recebiam destaque em vermelho). Os coordenadores, por sua vez, sabiam onde focar maiores esforços na promoção de treinamentos sobre os temas considerados mais difíceis.

Com a maturidade do programa, uma das dificuldades de manejo que permanece, tanto na PI de morango como de vários outros produtos, é a necessidade de manutenção das anotações nos cadernos de campo. Calegario et al. (2013) publicaram uma metodologia de **avaliação dos registros nos cadernos de campo** de produtores certificados, que se mostrou útil para a redução de ocorrência de não conformidades nas auditorias de certificação. No entanto, faz-se necessária a adoção em maior escala de aplicativos de celular para registro de procedimentos, com a finalidade de facilitar as anotações exigidas para manutenção da rastreabilidade na produção integrada.

Com o passar do tempo, a prefeitura de Atibaia e outros parceiros criaram e aperfeiçoaram um grupo de iniciativas, que passaram a ser chamadas de **“enxoval da PIMo”**, com objetivo de incentivar a adesão e a manutenção dos agricultores no Programa. Na safra de 2021, por exemplo, a Prefeitura da Estância de Atibaia se responsabilizou pelos seguintes itens: 1) Pagamento da certificação para oito produtores do município; 2) Análise de solo; 3) Preparo do solo (Patrulha Agrícola); 4) Fornecimento de sementes de adubação verde (que em algumas safras anteriores foram fornecidas pela CATI); 5) Fornecimento de calcário; 6) Adubação orgânica (pica-galho); 7) Mudanças de morango, e 8) Cadernos de campo. A Embrapa Meio Ambiente, por sua vez, patrocinou: 1) Análise de água nas Unidades Demonstrativa de Atibaia, SP; e 2) Pagamento da certificação na Unidade Demonstrativa de Piedade, SP.

Essas ferramentas são mecanismos simples, que podem ser utilizados tanto em estabelecimentos que estão implementando o sistema de produção integrada, quanto em produtores já certificados, com objetivo de monitorar a adoção dos procedimentos de acordo com as normas.

## **Desenvolvimento de modelo de capacitação**

O primeiro curso de Formação de responsáveis técnicos e auditores da produção integrada de morango, foi realizado em outubro de 2009, com carga horária de 40 horas, usando como modelo os cursos da Produção integrada de maçã. As primeiras 32 horas de aulas teóricas abordaram um módulo conceitual sobre a PI-Brasil (diretrizes gerais) e as normas técnicas específicas, e as 8 horas práticas foram realizadas na Unidade Demonstrativa Central da PIMo, localizada no Parque Duílio Maziero (Parque do Morango), em Atibaia, SP, usando a metodologia de auditorias explicativas ou simuladas, já mencionadas.

Esse mesmo modelo foi reproduzido em 2011, quando foram realizados três cursos ao mesmo tempo, em uma parceria entre APTA, CATI, e Embrapa Meio Ambiente para Formação de responsáveis técnicos e auditores da Produção integrada de citros, goiaba e morango. Foi oferecido um módulo conceitual, nas primeiras oito horas teóricas, comum às três culturas, com todas as turmas na mesma sala. Os módulos de processo produtivo (16 horas teóricas) e prático (8 horas, no campo) foram específicos para cada cultura, com as turmas separadas.

Em 2014, 2016, 2017 e 2018, foram realizadas novas edições do curso específico para produção integrada de morango, repetindo-se a divisão de módulo conceitual, módulo processo produtivo e módulo prático, sempre com a parceria da Embrapa Gado de Leite. Vários coordenadores de projetos de produção integrada de outras culturas participaram como alunos para conhecerem o modelo de treinamento, e, anos mais tarde, promoveram cursos específicos para formação de responsáveis técnicos e auditores da produção integrada de pimentão, feijões e pulses e hortaliças folhosas.

## **Outras culturas que utilizaram as contribuições da Embrapa Meio Ambiente na implementação e nos treinamentos de programas de Produção Integrada**

Além da forte atuação de quase 20 anos na PIMo, a Embrapa Meio Ambiente, nos últimos anos, vem desenvolvendo projetos na produção integrada do amendoim (Piame) e colaborando em projetos de outros produtos. Inicialmente, o desenvolvimento da Piame ocorreu fundamentalmente por meio do projeto Produção Integrada Agropecuária (PI-Brasil), originado a partir da iniciativa Mapa-Embrapa, e sob lide-

rança da Embrapa Algodão. A primeira etapa do projeto, ocorrida entre 2005 e 2008, envolveu ações voltadas a pesquisa, fomento e elaboração das Normas Técnicas Específicas da Piame, com atividades realizadas nos estados de São Paulo, Ceará e Paraíba (Suassuna et al., 2006; Suassuna et al., 2012). A partir da cooperação com a Embrapa Algodão, a Embrapa Meio Ambiente desempenhou papel fundamental para a Piame, com base em todo conhecimento e vivência obtidos a partir da Produção Integrada do Morango (PIMo), cujo desenvolvimento se encontrava em etapa mais avançada naquele período. As contribuições ocorreram principalmente nas atividades de elaboração da NTE, tanto com sugestões durante a construção dos itens que compuseram o documento, como no método utilizado nas reuniões com atores da cadeia produtiva, especialmente produtores, pesquisadores, técnicos e demais representantes de cooperativas e empresas beneficiadoras exportadoras de amendoim.

A partir da publicação da NTE em novembro de 2016 (Costa et al., 2019), a continuidade do desenvolvimento da Piame na segunda fase do projeto contou com ações realizadas na Paraíba e, principalmente, nas principais regiões produtoras de São Paulo (Alta Mogiana e Alta Paulista), entre 2017 e 2020. As ações envolveram palestras em eventos da cadeia produtiva, instalação de Unidades de Referência Tecnológica (URTs) e a realização de cursos para formação de cerca de 70 responsáveis técnicos (RTs), em parceria com Universidade Federal de Viçosa e apoio da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/Unesp), cooperativas, empresas produtoras, indústria e a Câmara Setorial do Amendoim do Estado de São Paulo.

Nessa segunda fase do projeto, as contribuições da Embrapa Meio Ambiente foram de extrema importância para o planejamento e execução de dias de campo e aulas presenciais, que finalizaram os cursos de formação de RTs, realizados na região de Jaboticabal e Tupã naquele período.

Assim, a Embrapa Meio Ambiente, em trabalho com a Embrapa Algodão, tem trazido contribuições efetivas para a Piame. Dessa maneira, a produção integrada passou a ser uma política pública com ações também voltadas para o aprimoramento e a sustentabilidade da produção e da cadeia produtiva do amendoim, pautada em boas práticas agrícolas, rastreabilidade e qualidade do alimento produzido.

Além da cadeia produtiva do amendoim, a Embrapa Meio Ambiente também deu apoio aos Programas de PI de pimentão, coordenado pela Embrapa Hortaliças, e PI de feijões e pulses, então coordenado pela Embrapa Arroz e Feijão. Inicialmente, os coordenadores desses programas participaram integralmente do curso teórico-prático de Formação de responsáveis técnicos e auditores da PIMo, com carga horária de 40 horas, tradicionalmente oferecido na forma presencial pela Embrapa Meio Ambiente. Esse intercâmbio foi extremamente positivo para todos os envolvidos, e, já nos anos seguintes, foram oferecidos cursos em formatos parecidos – e com melhorias – para as cadeias do pimentão e dos feijões e pulses, nos quais a Embrapa Meio Ambiente

esteve presente, apresentando o *case* do morango e/ou ministrando as aulas sobre a Portaria Inmetro nº 443, de 2011 (Inmetro, 2011), que rege a certificação para obtenção do Selo Brasil Certificado, único para todas as cadeias.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Produção Integrada de Morango (PIMo) é uma tecnologia desenvolvida, aprimorada e fortalecida em São Paulo pela Embrapa e parceiros desde 2006. Tem como diferencial a disponibilização de um alimento de alta qualidade e segurança (inocuidade), produzido a partir de um sistema de produção mais sustentável.

Ao longo desse período, foram capitaneadas pela Embrapa uma série de ações que levaram à organização, implementação, certificação e manutenção do sistema, além de fornecer suporte à política pública junto ao Mapa, tendo como modelo a PIMo na região de Atibaia e Jarinu, SP. Em 2011, produtores dessa região conquistaram a certificação, sendo o primeiro grupo autorizado a utilizar o Selo Brasil Certificado em morangos no Brasil.

Conforme detalhado nesse capítulo, são vários os aspectos técnicos que caracterizam e diferenciam a produção integrada e a situam no caminho de conversão para modelos de produção mais sustentáveis, e que atendam às demandas da sociedade. Também foram vários os fatores que levaram à implementação bem-sucedida da PIMo e a posicionaram como um *case* de sucesso, com impactos positivos consistentes nas esferas econômica, social e ambiental. Em 2022, a PIMo totaliza uma produção de mais de 2.000 toneladas de morangos certificados no Brasil, abrangendo produtores certificados nos estados de São Paulo, Rio Grande do Sul e Paraná.

## REFERÊNCIAS

ABREU, A. C. de; CALEGARIO, F. F.; OLIVEIRA, P. G. de; ROSENTE, H.; BORGES, A. C.; IWASSAKI, L. A. Diário de campo: ferramenta para desenvolver o hábito de registrar procedimentos na produção integrada de morango. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 9.; SEMINÁRIO SOBRE O SISTEMA AGROPECUÁRIO DE PRODUÇÃO INTEGRADA, 1., 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2007. p. 102-106.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Manual de procedimentos**: instrução normativa conjunta 01, de 16 de junho de 2014: registro de agrotóxicos para culturas com suporte fitossanitário insuficiente – CSFI. Brasília, DF: Mapa: ANVISA, 2015. 24 p. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/agrotoxicos/arquivos/manual-de-procedimentos-de-registro-de-agrotoxicos-para-culturas-com-suporte-fitossanitario-insuficiente-1.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Monografias autorizadas**. Brasília, DF: ANVISA, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/setorregulado/regularizacao/agrotoxicos/monografias/monografias-autorizadas-por-letra>. Acesso em: 08 dez. 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Programa de análise de resíduos de agrotóxicos em alimentos (PARA)**: monitoramento de resíduos de agrotóxicos nos alimentos: trabalho desenvolvido pela Anvisa, com as vigilâncias sanitárias dos estados do AC, BA, DF, ES, GO, MG, MS, PA, PE, PR, RJ, RS, SC, SE, SP, TO, e com os laboratórios IAL/SP, IOM/FUNED e LACEN/PR: relatório de atividades de 2001-2007. Brasília, DF: ANVISA/Gerência Geral de Toxicologia, 2008. 21 p. Disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/agrotoxicos/programa-de-analise-de-residuos-em-alimentos/arquivos/3813json-file-1>. Acesso em: 11 mar. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Programa de análise de resíduos de agrotóxicos em alimentos (PARA)**. Relatório de atividades de 2011 e 2012. Brasília: ANVISA. Gerência-geral de Toxicologia, 2013. Disponível em <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/agrotoxicos/programa-de-analise-de-residuos-em-alimentos/arquivos/3791json-file-1>. Acesso em: 11 mar. 2022.

AGROLINK. Produtores de morango são multados no Rio Grande do Sul. **Agrolink Notícias**, 06 jul. 2004. Disponível em: [https://www.agrolink.com.br/noticias/produtores-de-morango-sao-multados-no-rio-grande-do-sul\\_18568.html](https://www.agrolink.com.br/noticias/produtores-de-morango-sao-multados-no-rio-grande-do-sul_18568.html). Acesso em: 15 ago. 2023.

ANDRIGUETO, J. R.; KOSOSKI, A. R. (org.). **Marco legal da produção integrada de frutas no Brasil**. Brasília, DF: Mapa/SARC, 2002. 58 p.

ANTUNES, O. T.; CALVETE, E. O.; ROCHA, H. C.; NIENOW, A. A.; CECCHETTI, D.; RIVA, E.; MARAN, R. E. Produção de cultivares de morangueiro polinizadas pela abelha jataí em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, v. 25, n. 1, p. 94-99, 2007.

ATIBAIA. **Lei n. 3.342, de 10 de outubro de 2003**. Estabelece convênio da Prefeitura com a Embrapa para o desenvolvimento de atividades na área de interesse agro-ambiental. Atibaia: Câmara Municipal, 2003. Disponível em: <http://leismunicipa.is/lekdg>. Acesso em 23 nov. 2023.

BARBOSA, J. F.; ORTH, A. I. Importância da polinização biótica na produtividade de *Fragaria* × *ananassa* (Duchesneex Weston) DuchesneexRozier 'Aromas' e a diversidade e abundância de abelhas em áreas de cultivo convencional e orgânico. **Acta Biologica Paranaense**, v. 49, n.1-2, p. 37-66, 2020.

BORTOLOZZO, A. R.; VALDEBENITO-SANHUEZA, R. M.; MELO, G. W. B. de; KOVALESKI, A.; BERNARDI, J.; HOFFMANN, A.; BOTTON, M.; FREIRE, J. de M.; BRAGHINI, L. C.; VARGAS, L.; CALEGARIO, F. F.; FERLA, N. J.; PINENT, S. M. J. **Produção de morangos no sistema semihidropônico**. 2. ed. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2007. 24 p. (Embrapa Uva e Vinho. Circular Técnica, 62).

BOTTON, M.; KUHN, T. M. de A.; ZAWADNEAK, M. A. C.; LOECK, A. E. **Bioecologia e caracterização de danos de Neopamerabilobata (Say, 1832) (Hemiptera: Rhyparochromidae) em morangueiro**. Bento Gonçalves, RS: Embrapa Uva e Vinho, 2017. (Embrapa Uva e Vinho. Comunicado Técnico, 194)

BRASIL, Ministério da Agricultura e Pecuária. **Normas técnicas: cadernos de pós-colheita da PI-Brasil. Morango. NTE PIMo 2021**. Brasília, DF: Mapa. 2022b. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/producao-integrada/normas-tecnicas>. Acesso em 16 ago. 2023.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **AGROFIT Consulta Aberta**. Brasília, DF, 2003. Disponível em: [http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit\\_cons/principal\\_agrofit\\_cons](http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons). Acesso em: 08 de dezembro de 2021.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Cartilhas Produção Integrada**. 6 volumes. Brasília, DF: Mapa, 2022a. (Série Brasil Certificado, 6 volumes). Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/producao-integrada/publicacoes>. Acesso em: 1 set. 2022

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa Mapa n. 14, de 1 de abril de 2008. Aprova as Normas técnicas específicas para a produção integrada de morango - NTEPI-Morango. **Diário Oficial da União**, seção 1, p. 3-5, 01 abr. 2008a.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa Mapa n. 17, de 22 de dezembro de 2021. Aprova a norma técnica específica para a produção integrada de morango – NTE PIMo. **Diário Oficial da União**, ed. 241, seção 1, p. 4, 23 dez. 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa Mapa n. 24, de 24 de agosto de 2010. Altera o subitem 8.1 do Anexo da Instrução Normativa Mapa N 14, de 01 de abril de 2008 - na forma do Anexo à presente Instrução Normativa. **Diário Oficial da União**, seção 1, p. 16, 5 ago. 2010a.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa Mapa n. 27, de 30 de agosto de 2010. Diretrizes gerais com vistas a fixar preceitos e orientações para os programas e projetos que fomentem e desenvolvam a Produção Integrada Agropecuária (PI-Brasil). **Diário Oficial da União**, 31 ago. 2010c.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **PNCRC/Vegetal: controle de resíduos e contaminantes. Produtos de Origem Vegetal**. Brasília, DF: Mapa. 2008b. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/pncrcvegetal>. Acesso em: 11 de março de 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução normativa conjunta n. 01, de 23 de fevereiro de 2010. Estabelece as diretrizes e exigências para o registro dos agrotóxicos, seus componentes e afins para culturas com suporte fitossanitário insuficiente, bem como o limite máximo de resíduos permitido. **Diário Oficial da União**, seção 1, p. 19-21, 24 fev. 2010b.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Instrução normativa conjunta n. 01, de 16 de junho de 2014. Estabelecer as diretrizes e exigências para o registro dos agrotóxicos, seus componentes e afins para culturas com suporte fitossanitário insuficiente, bem como o limite máximo de resíduos permitido. *Diário Oficial da União*, Seção 1, p. 4-5, 18 jun. 2014.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. Portaria n. 114, de 27 de junho de 2013. Designar os membros da Comissão Técnica para a Produção do Morango. *Diário Oficial da União*, ed. 124. Seção 2, p. 8, 01 jul. 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Mobilidade Social, do Produtor Rural e do Cooperativismo. Portaria n. 3.690, de 30 de outubro de 2018. Atualizar os membros da Comissão Técnica para a Produção de Morango. *Diário Oficial da União*, ed. 215, Seção 2, p. 6, 08 nov. 2018.

BUSCHINELLI, C. C. de A.; CALEGARIO, F. F. Módulos ambientais de apoio à gestão da propriedade na produção integrada. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 11.; SEMINÁRIO SOBRE SISTEMA AGROPECUÁRIO DE PRODUÇÃO INTEGRADA, 3., 2009, Petrolina. **Produção integrada: base de sustentabilidade para a agropecuária brasileira**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido: Valexport, 2009. 1 CD-ROM. 7 p.

BUSCHINELLI, C. C. de A.; CALEGARIO, F. F.; BUENO, S. C. S.; LINO, J. S.; PASTRELLO, B. M. C.; RODRIGUES, G. S. Certificação participativa e gestão ambiental da produção integrada de morango. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 9.; SEMINÁRIO SOBRE O SISTEMA AGROPECUÁRIO DE PRODUÇÃO INTEGRADA, 1., 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2007. p. 97-101.

BUSCHINELLI, C. C. de A.; CALEGARIO, F. F.; MATSUURA, M. I. da S. F. Módulo de temas ambientais para apoio aos programas de capacitação dos projetos do Sistema Agropecuário de Produção Integrada (SAPI). In: FÓRUM DE APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS DE PESQUISA: AVANÇOS E OPORTUNIDADES, 1., 2014, Campinas. **Anais...** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2014. RE002. 4 p.

BUSCHINELLI, C. C. de A.; CALEGARIO, F. F.; RODRIGUES, G. S.; SERRA, A. L. de S.; SEMIS, J. B.; FERRARA, L.; ABRAÃO, J. B.; ADAMI, J. A.; MAZIERO, J. C. **Plano de gestão ambiental da produção integrada de morango: contribuição metodológica para a certificação**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016. 61 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 67).

BUSCHINELLI, C. C. de A.; PASTRELLO, B. M. C.; CALEGARIO, F. F. Avaliação de impacto socioambiental na introdução da produção integrada na cadeia produtiva de morango, região de Atibaia/Jarinu (SP). In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 11.; SEMINÁRIO SOBRE SISTEMA AGROPECUÁRIO DE PRODUÇÃO INTEGRADA, 3., 2009, Petrolina. **Produção integrada: base de sustentabilidade para a agropecuária brasileira**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido: Valexport, 2009. 1 CD-ROM. 7 p.

CALEGARIO, F. F. **Macroeducação para a promoção da produção integrada de morango no Estado de São Paulo**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2013. 7 p. (Série Coleciona. Ações e Projetos. Educação Ambiental e Agricultura Familiar).

CALEGARIO, F. F. Produção Integrada. In: ANTUNES, L.E.C.; REISSER JUNIOR, C.; SCHWENGBER, J.E. **Morangueiro**. Embrapa Clima Temperado, Pelotas, p. 333-342, 2016.

CALEGARIO, F. F.; BUSCHINELLI, C. C. de A.; LINO, J. S.; BUENO, S. C. S.; RODRIGUES, G. S. Environmental assessment of integrated fruit production practices for strawberry in São Bento do Sapucaí (SP, Brazil). Proceedings of VIII International Symposium on Temperate Zone Fruits in the Tropics and Subtropics, *Acta Horticulturae (ISHS)*, n. 872, p. 231-238, 2010a.

CALEGARIO, F. F.; HAMMES, V. S.; BUSCHINELLI, C. C. de A.; MORANDI, M. A. B. Produção integrada de morango (PIMo) em Atibaia e Jarinu, SP. In: FÓRUM DE APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS DE PESQUISA: AVANÇOS E OPORTUNIDADES, 1., 2014, Jaguariúna. *Anais... Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente*, 2014a. RE010. 7 p.

CALEGARIO, F. F.; HAMMES, V. S.; KMIT, M. C. P.; BAGDONAS, N. F. C. Good agricultural practices survey as a tool to develop Strawberry Integrated Production Program in Atibaia, São Paulo State, Brazil. In: INTERNATIONAL HORTICULTURAL CONGRESS, 28., 2010, Lisboa. *Science and horticulture for people: Abstracts... Lisboa: International Society for Horticultural Science*, v. 2, p. 72, 2010b. Poster S01.400.

CALEGARIO, F. F.; HAMMES, V. S.; SILVA, T. A. da; BAGDONAS, N. F. C. Diagnóstico do potencial da microrregião de Atibaia/Jarinu para adoção da produção integrada de morango. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 8., 2006, Vitória, ES. *Anais... Vitória, ES: [S.l.p.]*, 2006a. p. 257.

CALEGARIO, F. F.; HAMMES, V. S.; SILVA, T. A. da; BAGDONAS, N. F. C. Dificuldades e vantagens da produção de morangos segundo a percepção de produtores de Atibaia e Jarinu. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO MORANGO, 3.; ENCONTRO SOBRE PEQUENAS FRUTAS E FRUTAS NATIVAS DO MERCOSUL, 2., 2006, Pelotas, RS. *Resumos... Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado*, 2006d. p. 193-200.

CALEGARIO, F. F.; HAMMES, V. S.; SILVA, T. A. da; BAGDONAS, N. F. C. Estratégia operacional de implementação técnica da produção integrada de morango em Atibaia e Jarinu. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 9.; SEMINÁRIO SOBRE O SISTEMA AGROPECUÁRIO DE PRODUÇÃO INTEGRADA, 1., 2007, Bento Gonçalves. *Anais... Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho*, 2007. p. 107-111.

CALEGARIO, F. F.; HAMMES, V. S.; SILVA, T. A. da; BAGDONAS, N. F. C. Ver 1: percepção do diagnóstico ambiental da microrregião de Atibaia/Jarinu para adoção da produção integrada de morango. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO MORANGO, 3.; ENCONTRO SOBRE PEQUENAS FRUTAS E FRUTAS NATIVAS DO MERCOSUL, 2., 2006, Pelotas, RS. *Resumos... Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado*, 2006b. p. 101-106.

CALEGARIO, F. F.; HAMMES, V. S.; SILVA, T. A. da; BAGDONAS, N. F. C. Ver 2: Percepção do diagnóstico ambiental das propriedades rurais de Atibaia/Jarinu para adoção da produção integrada de morango. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO MORANGO, 3.; ENCONTRO SOBRE PEQUENAS FRUTAS E FRUTAS NATIVAS DO MERCOSUL, 2., 2006, Pelotas, RS. *Resumos... Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado*, 2006c. p. 48-51.

CALEGARIO, F. F.; IWASSAKI, L. A.; HAMMES, V. S. A situação da cultura e o desenvolvimento da produção integrada do morangueiro no Estado de São Paulo. In: SEMINÁRIO MINEIRO SOBRE A CULTURA DO MORANGUEIRO, 1., Pouso Alegre, 2008. *Inovações tecnológicas e prospecção de demandas técnico-científicas*. Pouso Alegre: EPAMIG, 2008. 30 p. CD-ROM.

CALEGARIO, F. F.; IWASSAKI, L. A.; SATO, M. E.; COSTA, H.; ZAWADNEAK, M. A. C. Produção integrada. **Informe Agropecuário**, v. 35, n. 279, p. 11-21, mar./abr. 2014b.

CALEGARIO, F. F.; KMIT, M. C. P.; CERDEIRA, A. L. Evaluation of integrated strawberry production field recording process in Atibaia, São Paulo State, Brazil. **IOBC-WPRS Bulletin**, v. 91, p. 287-291, 2013.

CALEGARIO, F. F.; SALUSTIO, P. E. B. Colha e pague como ferramenta de divulgação da produção integrada de morango. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 11.; SEMINÁRIO SOBRE SISTEMA AGROPECUÁRIO DE PRODUÇÃO INTEGRADA, 3., 2009, Petrolina. **Produção integrada: base de sustentabilidade para a agropecuária brasileira**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido: Valexport, 2009. 1 CD-ROM. 7 p.

CALEGARIO, F. F.; VICENTINI, N. M.; KMIT, M. C. P.; CHAVES, A. C. S. D. Avaliação da conformidade na validação da produção integrada de morango. In: SIMPÓSIO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, 2.; CONGRESSO DO INSTITUTO NACIONAL DE FRUTAS TROPICAIS, 1., 2010, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Universidade Federal de Sergipe, 2010c. 1 CD-ROM. 4 p.

CHAGNON, M.; GINGRAS, J.; OLIVEIRA, D. de. Complementary aspects of strawberry pollination by honey and indigenous bees (Hymenoptera). **Journal of Economic Entomology**, v. 86, p. 416-420, 1993.

CHAGNON, M.; GINGRAS, J.; OLIVEIRA, D. de. Pollination rate of strawberries. **Journal of Economic Entomology**, v. 82, p. 1350-1353, 1989.

CHAIM, A.; PESSOA, M. C. P. Y.; FERRACINI, V. L. Eficiência de Deposição de Pulverização em Videira, comparando Bicos e Pulverizadores. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v. 14, p. 41-46, jan./dez. 2004.

CONJUR. Sem permissão: produtores gaúchos são multados por utilizar agrotóxico proibido. **Boletim de Notícias Conjur**, 6 jul. 2004. Disponível em: [https://www.conjur.com.br/2004-jul-06/produtores\\_recebem\\_multa\\_utilizar\\_agrotoxico\\_proibido](https://www.conjur.com.br/2004-jul-06/produtores_recebem_multa_utilizar_agrotoxico_proibido). Acesso em: 17 ago. 2023.

CONNOR, L. J.; MARTIN, E. C. Components of pollination of commercial strawberries in Michigan. **HortScience**, v. 8, n. 4, p. 304-306, 1973.

COSTA, A. G. F.; SOARES, D. J.; ALMEIDA, R. P. de; SUASSUNA, T. de M. F.; GONDIM, T. M. de S. **Normas técnicas para produção integrada de amendoim**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2019, 35 p. (Embrapa Algodão, Comunicado Técnico, 378).

COSTA, H.; VENTURA, J.A. Doenças do morangueiro: diagnóstico e manejo. In: BALBINO, J.M. de S. **Tecnologias para produção, colheita e pós-colheita de morangueiro**. Vitória: Incaper, 2004. p. 39-56. (Incaper. Documentos, 124).

CRANE, E.; WALKER, P. **Pollination directory for world crops**. London: International Bee Research Association, 1984. 183 p.

EMBRAPA. **Morango Brasil Certificado**. 29 abr. 2021a. *Live* (92 min). Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=xrnfnjXKGyc>. Acesso em: 03 fev. 2022.

EMBRAPA. **Produção integrada de morango**. 2019. Vídeo (2min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=NLtytAv3PE>. Acesso em: 03 fev. 2022

EMBRAPA. **Selo Brasil Certificado: produção integrada agropecuária**. PI-Brasil. 21 fev. 2022. Animação (2min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=VXxinYf4vK8>. Acesso em: 04 mar. 2022.

EMBRAPA. **Selo Brasil Certificado: produção integrada de morango**. Vídeo 1. 29 abr. 2021b. Vídeo (1min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=zbNl8tXU7L4>. Acesso em: 03 fev. 2022.

EMBRAPA. **Selo Brasil Certificado: produção integrada de morango**. Vídeo 2. 05 mai. 2021c. Vídeo (1min). Disponível em: [www.youtube.com/watch?v=iPLo4pYoymc](https://www.youtube.com/watch?v=iPLo4pYoymc). Acesso em: 03 fev. 2022.

EMBRAPA. **Selo Brasil Certificado: produção integrada de morango**. Vídeo 3. 12 mai. 2021d. Vídeo (1min). Disponível em: [www.youtube.com/watch?v=Shs5rWq2EFA](https://www.youtube.com/watch?v=Shs5rWq2EFA). Acesso em: 03 fev. 2022.

EMBRAPA. **Selo Brasil Certificado: produção integrada de morango**. Vídeo 4. 19 mai. 2021e. Vídeo (1min). Disponível em: [www.youtube.com/watch?v=exLmAk7NIW8](https://www.youtube.com/watch?v=exLmAk7NIW8). Acesso em: 03 fev. 2022.

EMBRAPA MEIO AMBIENTE. **Fórum de adequação fitossanitária: como a nova legislação afetará a cultura do morango**. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna/SP, 05 mai. 2010. Disponível em: <https://www.cnpma.embrapa.br/nova/mostra2.php3?id=607>. Acesso em: 11 de março de 2022.

EMBRAPA MEIO AMBIENTE. **Métodos de detecção e de acompanhamento in loco dos resíduos de agrotóxicos nas frutas de manga e uva para exportação no semi-árido brasileiro** - EcoFIN. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1999c. (Projeto II.1999.222).

EMBRAPA MEIO AMBIENTE. **Monitoramento ambiental em fruticultura irrigada no agropolo Petrolina (PE)/Juazeiro (BA), com vias a obtenção de certificação de qualidade** - EcoIso. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1999d.

EMBRAPA MEIO AMBIENTE. **Monitoramento da qualidade das águas para o desenvolvimento do semi-árido brasileiro** – Ecoágua. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1999a. (Projeto II.1999.240).

EMBRAPA MEIO AMBIENTE. **Qualidade ambiental em fruticultura irrigada no nordeste brasileiro – Ecofrutas**. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1999b. (Projeto II.1999.239).

FERRACINI, V. L.; PESSOA, M. C. P. Y. **Aspectos toxicológicos e ambientais dos agrotóxicos aplicados na cultura do melão: produção integrada de melão**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical; Banco do Nordeste do Brasil, 2008. cap. 20, p. 237-247.

FOLEGATTI, M. I. da S.; CALEGARIO, F. F.; MATSUURA, F. C. A. U.; ALMEIDA, G. V. B. de; GUTIERREZ, A. de S. D. **Análise da Valoração do Maracujá no Mercado Atacadista de São Paulo: Contribuição à Padronização da Qualidade na PIF**. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 8., 2006, Vitória, ES. *Anais...* Vitória, ES, 2006. p. 218-219.

FRAGA, G. P. **Resíduos de agrotóxicos em morangos produzidos no estado do Rio Grande do Sul**. 2020. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: RS.

HAMMES, V. S. (ed.). **Proposta metodológica de macroeducação**. 3. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2012. v. 2. 338 p. (Educação ambiental para o desenvolvimento sustentável, v. 2).

HAMMES, V. S.; CALEGARIO, F. F.; SILVA, T. A. da. Agir: planejamento estratégico da Associação dos Produtores de Morango de Atibaia e Jarinu (SP) para a implementação da produção integrada. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 9.; SEMINÁRIO SOBRE O SISTEMA AGROPECUÁRIO DE PRODUÇÃO INTEGRADA, 1., 2007, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2007. p. 92-96.

HAMMES, V. S.; CALEGARIO, F. F.; SILVA, T. A. da; BAGDONAS, N. F. C. Diagnóstico do potencial de propriedades rurais de Atibaia/Jarinu para adoção da produção integrada de morango. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 8., 2006, Vitória, ES. **Anais...** Vitória, ES: [S.l.p.], 2006a. p. 258.

INMETRO. Portaria Inmetro n. 144, de 31 de julho de 2002. Regulamento de avaliação da conformidade para processo de produção integrada de frutas – PIF. **Diário Oficial da União**, seção 1, p. 57-59, 01 ago. 2002.

INMETRO. Portaria Inmetro n. 443, de 23 de novembro de 2011. Revisão dos requisitos de avaliação da conformidade para produção integrada agropecuária – PI Brasil. **Diário Oficial da União**, seção 01, p. 106, 24 nov. 2011.

INSTITUTO CERTIFICA. **Produção integrada de morangos**. 01 abr. 2022. *Live* (104min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=QN8zd5nrF-k>. Acesso em: 04 abr. 2022.

IWASSAKI, L. A. **Preferência hospedeira e estratégias de manejo do ácaro rajado, *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae), nas culturas de morango e crisântemo**. 2010. 88 f. Dissertação (Mestrado em Sanidade, Segurança Alimentar e Ambiental no Agronegócio) – Instituto Biológico, Campinas.

IWASSAKI, L. A.; SATO, M. E.; CALEGARIO, F. F.; POLETTI, M.; MAIA, A. de H. N. Comparison of conventional and integrated programs for control of *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae). **Experimental and Applied Acarology**, v. 65, n. 2, p. 205-217, 2014.

IWASSAKI, L. A.; SATO, M. E.; POLETTI, M.; CALEGARIO, F. F. **Estratégias de controle do ácaro rajado (*Tetranychus kochi*): comparação entre sistemas de produção convencional produção integrada de morango (PIMO)**. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 11., 8 a 11 set. 2009, Petrolina/PE. **Anais ...** Petrolina: Embrapa Semi-Árido: Valexport, 2009a. p. 1-7.

IWASSAKI, L. A.; SATO, M. E.; POLETTI, M.; CALEGARIO, F. F. **Monitoramento como ferramenta importante para o manejo de ácaro rajado - *Tetranychus urticae koch* - em produção integrada de morango**. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 10.; SEMINÁRIO SOBRE SISTEMA AGROPECUÁRIO DE PRODUÇÃO INTEGRADA (SAPI), 2., 20 a 22 ago. 2008, Ouro Preto/MG. **Produção integrada no Brasil**. Viçosa: UFV, 2008. 4 p. CD-ROM.

IWASSAKI, L. A.; SATO, M. E.; POLETTI, M.; CALEGARIO, F. F. **Proposta de escala de cores para monitoramento de ácaro rajado (*tetranychus urticae koch*) em cultura de morangueiro**. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 11.; SEMINÁRIO SOBRE SISTEMA AGROPECUÁRIO DE PRODUÇÃO INTEGRADA, 3., 2009, Petrolina. **Produção integrada: base de sustentabilidade para a agropecuária brasileira**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido: Valexport, 2009. 1 CD-ROM. 6 p.

KLATT, B. K.; HOLZSCHUH, A.; WESTPHAL, C.; CLOUGH, Y.; SMIT, I.; PAWELZIK, E.; TSCHARNTKE, T. Bee pollination improves crop quality, shelf life and commercial value. **Proceedings of the Royal Society B**, v. 281, n. 1775, p. 1-8, 2014.

KMIT, M. C. P. Avaliação da patogenicidade do fungo *Pestalotiopsis longisetula* associado a estresses no desenvolvimento do “vermelhão” em morangueiros. 2010. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Ciências Biológicas), Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas.

KMIT, M. C. P.; MORANDI, M. A. B.; CALEGARIO, F. F. Associação de *Pestalotiopsis longisetula* no desenvolvimento do “vermelhão” em morangueiro. In: CONGRESSO PAULISTA DE FITOPATOLOGIA, 34., 2011, Campinas. [Resumos...] Campinas: Grupo Paulista de Fitopatologia, 2011. n. 193.

LIMA, E. Especialistas se reúnem em Jaguariúna para definir estratégias de utilização de agrotóxicos em *Minor Crops*. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 17 mar. 2008. Disponível em: <https://www.cnpma.embrapa.br/nova/mostra2.php3?id=364>. Acesso em: 11 de março de 2022.

LOPES, P. R. C.; SILVA, A. S.; PESSOA, M. C. P. Y.; SILVA, C. M. M. S.; FERRACINI, V. L.; HERMES, L. C.; SÁ, L. A. N. de; HAMMES, V. S.; FRIGHETTO, R. M. T.; CHAIM, A.; HAJI, N. P.; RAMOS, M. F.; MIRANDA, J. I.; FREIRE, L. C. L. Projeto de pesquisa em produção integrada de uvas finas de mesa. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 2., 2000, Bento Gonçalves, RS. **Anais...** Bento Gonçalves, RS: Embrapa Uva e Vinho, 2000. p. 51-59.

MALAGODI-BRAGA, K. S. A polinização como fator de produção na cultura do morango. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2018. 13 p. (Embrapa Meio Ambiente. Comunicado técnico, 56). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1091918>. Acesso em: 10 mar. 2022.

MALAGODI-BRAGA, K. S. A polinização do morangueiro (*Fragaria x ananassa*). In: SEMANA DOS POLINIZADORES, 2., 2010, Petrolina. **Palestras...** Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. p. 36-48. 85 p. (Embrapa Semiárido. Documentos, 229).

MALAGODI-BRAGA, K. S.; CALEGARIO, F. F. Por que avaliar a polinização na produção integrada de morango? SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 10.; SEMINÁRIO SOBRE SISTEMA AGROPECUÁRIO DE PRODUÇÃO INTEGRADA, 2., 2008, Ouro Preto. **Produção integrada no Brasil**. Viçosa: UFV, 2008. 4 p.

MALAGODI-BRAGA, K. S.; KLEINERT, A. M. P. Como o comportamento das abelhas na flor do morangueiro (*Fragaria ananassa* Duchesne) influencia a formação dos frutos? **Bioscience Journal**, Supplement 1, v. 23, p. 76-81, 2007.

MALAGODI-BRAGA, K. S.; KLEINERT, A. M. P. Could *Tetragonisca angustula* Latreille (Apinae, Meliponini) be effective as strawberry pollinator in greenhouses? **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 55, p. 771-773, 2004.

MARTINHO, D. Q.; GUTIERREZ, A. de S. D.; CALEGARIO, F. F.; ALMEIDA, G. V. B. de Levantamento preliminar das características qualitativas observadas pelos compradores de morango, durante a safra 2006, no Mercado Atacadista de São Paulo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO MORANGO, 3.; ENCONTRO SOBRE PEQUENAS FRUTAS E FRUTAS NATIVAS DO MERCOSUL, 2., 2006, Pelotas, RS. **Resumos...** Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2006. p. 92-95.

MONITORANDO a qualidade na produção integrada de morango. [Jaguariúna]: Embrapa Meio Ambiente, 2022. 1 folder.

MORANDI, M. A. B.; BETTIOL, W.; REZENDE, L. C. Biological inputs for the management of pests and diseases in strawberry. **Informe Agropecuário**. v. 35, n. 279, p. 64-74, 2014.

PASTRELLO, B. M. C.; BUSCHINELLI, C. C. de A.; CALEGARIO, F. F. Planejamento e gestão ambiental em estabelecimento dedicado à produção integrada de morango na região de Valinhos/SP. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 11.; SEMINÁRIO SOBRE SISTEMA AGROPECUÁRIO DE PRODUÇÃO INTEGRADA, 3., 2009, Petrolina. **Produção integrada: base de sustentabilidade para a agropecuária brasileira**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido: Valexport, 2009. 7 p.

PAULA JÚNIOR, T. J. de; MORANDI, M. A. B.; VENZON, M. Manejo integrado de doenças e pragas utilizando o controle biológico. In: HALFELD-VIEIRA, B. de A.; MARINHO-PRADO, J. S.; NECHET, K. de L.; MORANDI, M. A. B.; BETTIOL, W. **Defensivos agrícolas naturais: uso e perspectivas**. Brasília, DF: Embrapa, 2016. v. 1, p. 214-237.

PAULA JÚNIOR, T. J. de; MORANDI, M. A. B.; ZAMBOLIM, L.; SILVA, M. B. da. Controle alternativo de doenças de plantas: histórico. In: VENZON, M.; PAULA JÚNIOR, T. J. de; PALLINI, A. **Controle alternativo de pragas e doenças**. Viçosa, MG: Epamig/CTZM, 2005. p. 135-162.

PESSOA, M. C. P. Y.; SILVA, A. S.; CHAIM, A.; FERRACINI, V. L.; SILVA, C. M. M. S.; HERMES, L. C.; SÁ, L. A. N. de; RODRIGUES, G. S. Avaliação da qualidade ambiental em sistemas de produção integrada de frutas: experiência prática na produção e subsídio à certificação. **Informe Agropecuário**, v. 22, n. 213, p. 46-56, nov./dez. 2001a.

PESSOA, M. C. P. Y.; SILVA, A. de S.; FERRACINI, V. L.; CHAIM, A.; SÁ, L. A. N. de; SILVA, C. M. M. S.; HERMES, L. C.; RODRIGUES, G. S. Impacto ambiental em fruteiras irrigadas do submédio São Francisco: subsídios para a produção integrada da região. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 3., 2001b. Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2001b. (Embrapa Uva e Vinho. Documentos, 32). p. 62-68.

PROTAS, J. F. da S.; VALDEBENITO-SANHUEZA, R. M. (ed.). **Normas técnicas e documentos de acompanhamento da produção integrada de maçã**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2002. 64 p. (Embrapa Uva e Vinho. Documentos, 33).

RODRIGUES, G. S. **Avaliação de impactos ambientais em projetos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico agropecuário: fundamentos, princípios e introdução à metodologia**. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1998. 66 p. (EMBRAPA-CNPMA. Documentos, 14).

RODRIGUES, G. S.; CAMPANHOLA, C.; KITAMURA, P. C. **Avaliação de impacto ambiental da inovação tecnológica agropecuária: AMBITEC-AGRO**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2003. 95 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 34).

ROSENTE, H.; CALEGARIO, F. F.; ZERBINI FILHO, M. A. Casa de embalagem de placas planas recicladas e tetra pak®: alternativa econômica e viável para a produção integrada de morango. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 11.; SEMINÁRIO SOBRE SISTEMA AGROPECUÁRIO DE PRODUÇÃO INTEGRADA, 3., 2009, Petrolina. **Produção integrada: base de sustentabilidade para a agropecuária brasileira**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido: Valexport, 2009. 6 p.

SILVA, A. de S. **Racionalização do uso de agrotóxicos em frutas irrigadas exportáveis para adequação dos padrões de qualidade ISO 14.000**: Dipólo agroindustrial Petrolina (PE)/Juazeiro (BA). Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 1997. 60 p.

SILVA, A. de S.; LOPES, P. R. C.; PESSOA, M. C. P. Y.; SILVA, C. M. M. S.; FERRACINI, V. L.; HERMES, L. C.; SÁ, L. A. N. de; HAMMES, V. S.; FRIGHETTO, R. M. T.; CHAIM, A.; HAJI, N. P.; RAMOS, M. F.; MIRANDA, J. I.; FREIRE, L. C. L. Novas estratégias de pesquisa e desenvolvimento na produção integrada de frutas (PIF). 1. projeto de pesquisa em produção integrada de manga. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 2., 2000, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2000. p. 36-50.

SILVA, A. de S.; PESSOA, M. C. P. Y.; FERRACINI, V. L.; CHAIM, A.; SILVA, C. M. M. S.; HERMES, L. C. Produção integrada de frutas - o que é? **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 213, p. 5-14, nov./dez. 2001.

SOUZA, E. B. de. Regularização das Culturas com Suporte Fitossanitário Insuficiente (CSFI) – “*Minor Crops*”. In: ENFRUTE, 16. Levando conhecimento e tecnologia para a fruticultura. 2019. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE FRUTICULTURA DE CLIMA TEMPERADO, 16, 2019, Fraiburgo, SC. **Anais...** Caçador, SC: Epagri, vol 1 (palestras), 2019. 130 p. p. 64-68.

SUASSUNA, T. de M. F.; ASSIS, J. S. de; PENARIOL, A.; CALEGARIO, F. F. Produção integrada - amendoim: qualidade e segurança baseados em planejamento, capacitação, boas práticas e monitoramento. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 8., 2006, Vitória. **Anais...** Vitória: Incaper, 2006. p. 265.

SUASSUNA, T. M. F.; SUASSUNA, N. D.; FERNANDES, O. A.; ASSIS, J. S.; DOMINGUES, M. A. C.; ALMEIDA, R. P.; COUTINHO, W. M.; TANAKA, R. T.; GODOY, I. J.; GONDIM, T. M. S.; ALMEIDA, F. A. C.; SOFIATTI, V.; MEDEIROS, E. P.; FREIRE, R. M. M.; PENARIOL, A. L.; CORÓ, J. R.; MINOTTI, D.; MATRANGOLO JÚNIOR, E.; GABRIELLO, L.; MONTEIRO, F. **Produção Integrada de Amendoim nos estados de São Paulo, Ceará e Paraíba**. Campina Grande, PB: 2012, 76 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 93).

VICENTINI, N. M.; CALEGARIO, F. F.; IWASSAKI, L. A. Avaliação da conformidade na implementação das normas técnicas da produção integrada de morango. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 10.; SEMINÁRIO SOBRE SISTEMA AGROPECUÁRIO DE PRODUÇÃO INTEGRADA, 2., 2008, Ouro Preto. **Produção integrada no Brasil: anais...** Viçosa: UFV, 2008. 4 p.

WITTER, S.; RADIN, B.; LISBOA, B. B.; TEIXEIRA, J. S. G.; BLOCHTEIN, B.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. C. Desempenho de cultivares de morango submetidas a diferentes tipos de polinização em cultivo protegido. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 1, p. 58-65, jan. 2012.

ZEBROWSKA, J. Influence of pollination modes on yield components in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.). **Plant Breeding**, v. 117, n. 3, p. 255-260, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1998.tb01935.x>.



# CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA NO AMBIENTE AGRÍCOLA

*Marco Antonio Ferreira Gomes, Lauro Charlet Pereira, Ricardo de Oliveira Figueiredo e Anderson Soares Pereira*

## INTRODUÇÃO

A água e o solo são recursos naturais essenciais à manutenção da vida e particularmente fundamentais para o desenvolvimento das atividades agrícolas. A degradação dos recursos hídricos e do solo no meio rural tem se tornado um grave problema, tanto no cenário internacional quanto no nacional, afetando extensas regiões do globo, e suas causas estão relacionadas ao manejo incorreto e às práticas inadequadas adotadas na agricultura. Tal situação é agravada pela existência de graves problemas de ordem ambiental e socioeconômica, o que afeta o processo de desenvolvimento sustentável de toda a cadeia produtiva, com destaque para a agropecuária. Acrescenta-se a esse cenário as mudanças climáticas em curso, que têm influenciado substancialmente na alteração do regime de chuvas em todo o planeta, com predomínio de escassez ou redução drástica em vários países, dentre os quais está o Brasil (Artaxo, 2020).

Assim, torna-se imprescindível a adoção de técnicas de cultivo com foco sustentável, preconizadas há quase duas décadas, por diversos trabalhos no Brasil, dentre os quais se destaca o Manual de Boas Práticas Agrícolas e Sistema APPCC (MANUAL de Boas Práticas Agrícolas e Sistema APPCC, 2004; Gomes et al., 2006). É fato que muitos produtores rurais têm assimilado as orientações técnicas disponibilizadas. No entanto, existe um número expressivo que não segue adequadamente tais orientações, gerando, assim, imensos impactos negativos em suas propriedades.

Para que ocorra uma mudança de comportamento de forma mais abrangente e efetiva no ambiente agrícola, é fundamental que o produtor rural compreenda a necessidade da busca permanente da sustentabilidade neste meio, como forma de tornar o setor uma força motriz capaz de sustentar todo o processo de suprimento alimentar em caráter global, tanto para os países mais ricos quanto para aqueles mais pobres.

Para tanto, a disseminação de práticas agrícolas de baixo custo, aliadas a diversas ações governamentais, com incentivos e subsídios ao meio agrícola, tornam-se funda-

mentais, principalmente para pequenos e médios agricultores. Tais ações já estão em curso em diversos países, a exemplo do Brasil, onde alguns programas estão direcionados para a adoção dos serviços ambientais e ecossistêmicos, essenciais na viabilização e sustentação, principalmente, das pequenas propriedades rurais (Prado et al., 2015; Gomes et al., 2021a).

Frente ao exposto, o presente trabalho procura evidenciar a importância das práticas de manejo e conservação do solo e da água no ambiente agrícola brasileiro, levando em conta experiências adquiridas em alguns projetos conduzidos pela Embrapa Meio Ambiente ao longo de mais de duas décadas (1994–2017). Para tanto, são apresentados resultados de várias pesquisas desenvolvidas em algumas regiões do país, bem como uma análise dos impactos gerados, tanto do ponto de vista potencial quanto efetivo, como forma de contribuição para estudos futuros, além de oferecer, ainda, a gestores em diversos níveis (municipal, estadual e federal), subsídios na formulação de políticas públicas sustentáveis para o meio rural.

## MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA EM ÁREAS TRADICIONAIS DE CULTIVO

### Projeto Guaíra, SP: Agricultura intensiva/irrigada (1994–1998; 2010–2014)

O município de Guaíra, localizado na porção norte do estado de São Paulo, caracteriza-se pela forte vocação agrícola, sobretudo na agricultura irrigada, com amplo destaque no estado para as culturas de soja, milho, tomate e feijão, desde o início dos anos 1980. Esse cenário contribuiu para que ocorresse uma demanda de pesquisa sobre as atividades desenvolvidas no meio rural do município, notadamente em relação aos impactos gerados, tanto positivos quanto negativos. Assim, de 1994 a 1998, a Embrapa Meio Ambiente deu início à execução de um projeto de pesquisa em propriedades agrícolas irrigadas de Guaíra (Latitude 20°07'22" e 20°27'30"S e Longitude 48°38'46" e 48°08'45"W), principalmente na Fazenda Macaúbas (coordenada geográfica central da propriedade: latitude 20°19' S e longitude 48°18' W), com o propósito de avaliar as práticas agrícolas adotadas, em especial os impactos gerados, e propor alternativas de manejo no sentido de tornar o sistema agrícola mais sustentável, e, ainda, com a possibilidade de replicar tais práticas em outras regiões do país (Valarini et al., 2006). Neste trabalho foi realizado um estudo metodológico, comparando-se dois tratamentos: um sistema de manejo alternativo (SA) e outro convencional (SC), utilizado pelo produtor em sistema de preparo convencional do solo (PC) ou em sistema de plantio direto (PD), tendo a mata nativa (M) como um sistema referência autossustentável. Nessa avaliação, foram adotados vários parâmetros, tais

como: a) compactação do solo, velocidade de infiltração básica da água, agregação de partículas do solo, pH, V%, CTC e teor de matéria orgânica; e b) incidência de patógenos e pragas, grupos de microrganismos, atividade enzimática da desidrogenase, polissacarídeos e biomassa microbiana e de produtividade. Após três anos, os resultados mostraram que o PD reduziu em 50% a incidência de patógenos produtores de escleródios (*Sclerotium rolsii* e *Sclerotinia sclerotiorum*). Observou-se também melhoria das propriedades físicas e químicas do solo, verificadas pela maior quantidade de matéria orgânica incorporada, maior atividade microbiana e agregação de partículas do solo avaliadas pela quantificação de polissacarídeos, desidrogenase e biomassa em carbono (C), e, por conseguinte, menor incidência dos patógenos. Tais resultados evidenciaram que as práticas de manejo de solo adotadas permitiram a melhoria das propriedades físicas do solo e facilitaram a infiltração de água, além da redução de patógenos no solo.

Outro trabalho realizado em Guaira refere-se ao uso intensivo de agrotóxicos, no qual os principais solos (Latossolo Vermelho distroférico típico – LVdf – e Latossolo Vermelho aluminoférico típico – LVaf) atuaram como uma barreira natural, principalmente devido às suas características físicas, como grande espessura, textura argilosa, e grande capacidade de armazenamento de água, impedindo, assim, o movimento desses produtos até a água subterrânea. (Filizola et al., 2002). Esse cenário mostra que o manejo adequado de solos profundos e bem estruturados pode evitar a contaminação do lençol freático por agrotóxicos, possibilitando a manutenção da qualidade e quantidade da água em subsuperfície.

Outra abordagem sobre Guaira refere-se à avaliação direta do impacto da agricultura irrigada, que pode ser obtida pela avaliação da alteração na concentração de substâncias dissolvidas na água prévia e posteriormente à sua aplicação em áreas cultivadas, e pela consideração das restrições impostas ao uso da água em consequência destas alterações, mesmo o próprio uso para irrigação. Por exemplo, um estudo realizado na região de Guaira indicou aumentos consideráveis nas concentrações de várias substâncias dissolvidas em água utilizadas para irrigação, quando comparados os sistemas de plantio direto (SPD) e de plantio convencional (SPC), de acordo com Rodrigues e Irias (2004). Mesmo que o estudo tenha evidenciado que no sistema de plantio convencional as fontes de captação (cursos d'água) estão recebendo uma carga maior de resíduos químicos, ainda assim elas apresentam menor concentração de produtos químicos em relação à água de irrigação.

Já as práticas de cultivo com adoção do sistema de plantio direto para cana-de-açúcar no município de Guaira têm alterado diversos aspectos no manejo da cultura, devido ao não revolvimento do solo e à manutenção da palha em superfície. Assim, o trabalho desenvolvido por Gonçalves et al. (2013) avaliou a fertilidade do solo em cinco áreas cultivadas com cana-de-açúcar em sistema de plantio direto (SPD) por

diferentes períodos em solo ácrico. Foram encontradas diferenças principalmente nas camadas mais superficiais. Na camada 0–20 cm, por exemplo, os teores de Matéria Orgânica (MO), Fósforo (P), Cálcio (Ca), Soma de Bases (SB), Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Saturação por Bases (V%) foram maiores na área mais nova (um ano). Os resultados indicam que a queda de produtividade, que leva à reforma dos canaviais, está relacionada às alterações na fertilidade do solo, com redução do pH e diminuição de Ca, MO, SB, CTC e V%. Nessa abordagem, o manejo do solo tem como foco a palhada como uma prática vegetativa de proteção do solo, com ênfase para as propriedades de ordem química (fertilidade).

Outro estudo realizado em Guaíra está relacionado ao acompanhamento da dinâmica e das taxas de decomposição de diferentes quantidades de palhada de cana-de-açúcar mantidas sob o solo após a colheita, de acordo com Moraes et al. (2014). Foi observado que a utilização da colheita mecanizada nas lavouras gera uma massa seca, ou palhada, que, ao ser depositada sobre o solo, pode provocar mudanças significativas no manejo da cultura. Rossetto et al. (2013) admitem que, embora grande parte da palhada seja decomposta ao longo do ciclo da cana-de-açúcar, transformando-se em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), os benefícios relacionados à ciclagem de nutrientes, adição de matéria orgânica e conservação do solo são consideráveis, principalmente ao longo dos anos, tendo em vista que as adições são anuais e consecutivas (Moraes et al., 2014). Nessa abordagem, há mais uma referência aos benefícios da palhada de cana-de-açúcar na manutenção das propriedades físicas e químicas do solo, mostrando a importância das diversas práticas de manejo na sua proteção. Nesse cenário, os riscos de erosão do solo são minimizados, bem como as perdas de água por escoamento superficial (*run off*).

### Impactos potenciais e efetivos gerados pelo projeto

Para efeito de interpretação e compreensão das discussões relativas aos impactos, os mesmos serão aqui definidos da seguinte forma: impactos potenciais são aqueles presumidos ou estimados, e assim apresentam valores qualitativos sobre determinado benefício (positivo) ou dano (negativo); já os impactos efetivos ou reais são aqueles avaliados ou identificados de forma concreta sobre um determinado bem ou ambiente.

Assim, na presente abordagem, tem-se que o uso de um sistema de produção alternativo, em comparação ao sistema de produção convencional (SC), sob dois sistemas de cultivo/plantio – convencional (PC) e direto (PD) –, para as culturas de soja e milho em cinco propriedades do município de Guaíra, de acordo com Valarini et al. (2006), mostrou que o SA apresenta-se promissor, com grande impacto potencial positivo, principalmente pelas reduções de escleródios no solo, da ordem de 20% a 39% e de 81% a 100% na incidência de *S. sclerotiorum* (Ss) e *S. rolfsii* (Sr), respectivamente, com predominância no PC.

Já em relação à produtividade das culturas de soja e milho, o sistema alternativo (SA) apresentou impacto efetivo positivo, com aumento para o milho de 2,9% a 14,4% em relação ao Sistema Convencional (SC), enquanto, para a soja, ocorreu o inverso, com aumento de até 14,5% no Sistema Convencional (SC).

Em relação à influência das propriedades físico-hídricas do solo na retenção de agrotóxicos, principalmente o LVdf, que é predominante na área estudada (Fazenda Macaúba), o trabalho desenvolvido por Filizola et al. (2002) mostrou que os impactos potenciais, principalmente positivos, estão associados ao impedimento que tais solos oferecem para a movimentação de agrotóxicos, sendo, assim, de grande importância na avaliação preliminar dos riscos de contaminação da água subterrânea.

Em relação aos riscos efetivos, tem-se que os resultados das avaliações físico-hídricas, aliadas ao baixo potencial de lixiviação de vários agrotóxicos utilizados à época (período entre janeiro de 1995 e julho de 1997), indicaram baixo ou nulo potencial de contaminação das águas subterrâneas na região de Guaíra. No monitoramento da água subterrânea, por exemplo, foram selecionados poços em três profundidades distintas: 1 m a 3 m, nível mínimo e máximo, 8 m a 50 m e > 100 m de profundidade, com análise dos pesticidas Captan, Clorotalonil, Clorpirifós, Dicofol, Endosulfan, Lambda-cialotrina, Metil paration e Trifluralina. Os resultados das análises de água subterrânea, para todos os produtos citados, mostraram a ausência (ND – Não Detectável) no período amostrado entre 1995 e 1997.

De fato, uma combinação entre as características físico-hídricas do solo, as práticas mecânicas adequadas de manejo e os pesticidas com baixo potencial de lixiviação ( $Koc > 300 \text{ mLg}^{-1}$ ) mostrou-se eficiente na manutenção dos aspectos quali-quantitativos da água na área estudada, sobretudo com a ausência de pesticidas na água subterrânea da região (Aquífero Guarani).

Em relação à agricultura irrigada em Guaíra, os impactos potenciais positivos que podem ser alcançados referem-se uma análise técnica comparativa entre o sistema de plantio direto na palha e o sistema convencional de preparo do solo, a partir da qual realizou-se uma avaliação da adequação desses dois sistemas com a implantação em um projeto de irrigação (Rodrigues; Irias, 2004).

Concluiu-se, então, que a introdução da irrigação, mantendo-se o sistema convencional de cultivo, com revolvimento repetido do solo e sua exposição à erosão, tende a causar um impacto negativo. Já a irrigação sob sistema de plantio direto, que tende a conservar o solo contra erosão, traria um impacto positivo, inclusive com melhorias econômicas e sociais. A variação diferencial entre os dois sistemas, para cada parâmetro, indica quais destes apresentam vantagens em cada sistema, e aponta aqueles que trarão melhorias mais significativas, caso tenham seus problemas reduzidos, em especial por alteração e adequação tecnológica.

Em relação aos impactos efetivos da irrigação na região de Guaíra, uma medida direta foi obtida pela simples avaliação da alteração na concentração de substâncias dissolvidas na água, prévia e posteriormente à sua aplicação em áreas cultivadas, e pela consideração das restrições impostas ao uso da água em consequência destas alterações, mesmo o próprio uso para irrigação. Com os resultados desses estudos, compôs-se um índice de qualidade ambiental que expressa o impacto da agricultura irrigada na microbacia estudada (Rodrigues; Irias, 2004).

A abordagem relacionada ao impacto do manejo da palhada sobre sua decomposição em área cultivada com cana-de-açúcar, desenvolvida dentro do Projeto Qualicana, de acordo com Moraes et al. (2014), mostra que ocorre um acúmulo considerável desse resíduo na superfície do solo, com maiores taxas de decomposição até 189 dias do ciclo, sendo mais lenta desse período até 328 dias. Assim, identifica-se um impacto da palhada sob dois aspectos: potencial, como matéria prima na fabricação de etanol de segunda geração, e efetivo, como fonte de nutrientes e de proteção do solo (na forma de cobertura morta) frente aos processos erosivos e à radiação solar direta.

Já o trabalho realizado por Gonçalves et al. (2013), também dentro do Projeto Qualicana, no município de Guaíra, mostrou que as áreas cultivadas com cana-de-açúcar, sob Sistema de Plantio Direto (SPD) em cinco áreas distintas, em solos semelhantes (Latosolo Vermelho, com exceção de uma área com Latossolo Amarelo), apresentaram comportamentos variáveis em relação à fertilidade, de acordo com o período em que foi cultivado.

### **Contribuições**

As contribuições dos trabalhos realizados em Guaíra, SP, aqui sumarizados, incluem vários benefícios relacionados ao manejo do solo e da água, entre os quais se destacam:

Melhoria das propriedades físicas e químicas do solo, em função da maior quantidade de matéria orgânica incorporada, maior atividade microbiana e agregação de partículas do solo, avaliadas pela quantificação de polissacarídeos, desidrogenase e biomassa em carbono e, por consequência, menor incidência de organismos patogênicos;

Manejo adequado de solos profundos e bem estruturados, a exemplo dos LVdf e LVaf, pode evitar a contaminação do lençol freático por agrotóxicos, possibilitando a manutenção da qualidade da água em subsuperfície;

O manejo do solo e a aplicação de agroquímicos interferem na qualidade da água de irrigação, com uma carga de produtos químicos maior do que a verificada nos corpos d'água, por exemplo, em áreas sob a influência do Sistema de Plantio Convencional; e

Manejo do solo com foco na palhada de cana-de-açúcar, como uma prática vegetativa, contribui para a proteção das propriedades do solo, com ênfase para as de ordem química (fertilidade). Também contribui para reduzir os riscos de erosão do solo, bem como as perdas de água por escoamento superficial (*run off*).

### **Projeto Solos Arenosos (Município de Guaraí, TO – 2013–2015): cultivo intensivo de soja**

As terras em que predominam solos arenosos, também conhecidos como solos de textura leve, distribuem-se em extensas áreas em todas as regiões do Brasil, sendo muito utilizadas em locais de intensificação da agricultura. O uso desses solos nos sistemas agrícolas tem efeito sobre suas características e atributos. Com o objetivo de avaliar as consequências desse uso sobre algumas das suas propriedades físicas, foi elaborado o Projeto Solos Arenosos, sob a Coordenação da Embrapa Solos e com a participação da Embrapa Meio ambiente. Entre as áreas selecionadas para estudo, foi contemplada uma propriedade agrícola localizada no município de Guaraí, TO. Em amostras de solos coletadas em 18 trincheiras, foram avaliadas a textura, a estabilidade dos agregados, o grau de flocculação das argilas, a porosidade, a densidade (Ds), a condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ), a infiltração e a retenção da água no solo. Os solos avaliados não apresentam nenhum dos parâmetros físico-hídricos analisados abaixo dos valores limite de degradação física ao solo, mesmo alguns deles sendo próximos, como o Diâmetro Poros Médio (DPM), que variou de 1,90 mm a 0,55 mm, o Índice de Estabilidade dos Agregados (IEA), que variou de 50% a 70%, e a densidade, de 1,34 g cm<sup>-3</sup> a 1,63 g cm<sup>-3</sup>. A variação da porosidade funcional (macroporosidade) entre as áreas de soja e Cerrado é bem marcante, assim como a variação da  $K_s$  no Cerrado. Como o movimento da água no solo é dependente da sua estrutura, e como a porosidade do solo é determinada pela forma como se arranjam suas partículas sólidas, observou-se que a granulometria da fração areia é um dos fatores importantes para a compreensão de seu comportamento (Filizola et al., 2017).

Apesar das restrições existentes em relação aos solos arenosos, eles são intensamente utilizados na produção de grãos e fibras e na pecuária. Solos de textura leve são aqui considerados como os que apresentam até a profundidade de 75 cm as classes texturais areia (> 850 g kg<sup>-1</sup> de areia), areia-franca (700 g kg<sup>-1</sup> a 850 g kg<sup>-1</sup> de areia) e franco-arenosa (500 g kg<sup>-1</sup> a 700 g kg<sup>-1</sup> de areia e < 200 g kg<sup>-1</sup> de argila). Esses solos ocupam área significativa do território brasileiro, como os Neossolos Quartzarênicos, que abrangem cerca de 20% da área do bioma Cerrado, em especial nas áreas de fronteira agrícola (MS, MT, TO, PI, MA e BA) (Donagemma et al., 2016). Os resultados de pesquisa obtidos por Filizola et al. (2017) em Guaraí mostram que alguns parâmetros

físicos do solo, com destaque para a macroporosidade e a densidade, se correlacionam de diversas formas com a Condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ). A causa desse comportamento, segundo Mesquita e Moraes (2004), seria a presença de um “megaporo”, que em uma amostra de solo afetará pouco a macroporosidade, mas muito sua Condutividade hidráulica.

### **Impactos potenciais e efetivos gerados pelo projeto**

Como impactos potenciais, os resultados integrados dos diversos parâmetros físicos podem contribuir para a melhor compreensão dos mecanismos de movimentação de água e de nutrientes no solo, permitindo a adoção de práticas mais adequadas, com o consequente aumento de produtividade desses solos.

Como impacto efetivo positivo, identifica-se no trabalho a manutenção da maior parte dos parâmetros físicos analisados dos solos cultivados – exceto a macroporosidade – dentro de um padrão aceitável, mesmo sendo intensamente utilizado, o que mostra a importância de um manejo adequado, a exemplo da fazenda Bom Jesus, onde foram realizados os experimentos de campo.

Como impactos efetivos ou reais negativos, considera-se que os solos arenosos estudados, quando comparados os dois cenários – vegetação de Cerrado e áreas cultivadas com soja –, apresentam diminuição substancial da macroporosidade nessas últimas, afetando todo o sistema solo-água-planta na faixa de abrangência do sistema radicular.

### **Contribuições**

As contribuições do projeto estão relacionadas diretamente à obtenção de informações relevantes para o manejo adequado de solos arenosos e correlatos, levando em conta a interação entre os parâmetros condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ), macroporosidade, megaporos e densidade, além da estabilidade dos agregados e do grau de floculação das argilas.

Outra contribuição dos solos arenosos ou de textura leve refere-se ao fracionamento da areia em diversas classes de tamanho, o que permite conhecer melhor tais solos e, assim, compreender melhor seu comportamento físico.

### **Projeto GeoVale (Município de Igaratá, SP – 2015–2016): cultivo intensivo de eucalipto.**

A eucaliptocultura é de grande importância para a região do Vale do Paraíba, no estado de São Paulo, onde é desenvolvida há mais de 60 anos, devido às condições

favoráveis de infraestrutura viária, industrial, comercialização, clima e grandes extensões territoriais.

O Projeto GeoVale, liderado pela Embrapa Territorial, com a participação de pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente, entre 2015 e 2016, realizou estudos de aspectos físicos, morfológicos e climáticos, denominados geoambientais, para a cultura do eucalipto, em escala regional (macro) e escala local (micro), no Vale do Paraíba Paulista. Na região, há predomínio de relevo acidentado, dos tipos ondulado a forte ondulado, com solos relativamente rasos e períodos de chuva intensos, cenário esse que exige atenção especial, para evitar perdas que possam comprometer a sustentabilidade do sistema da eucaliptocultura (Gomes et al., 2019).

Em escala local (micro), foi realizado um estudo de caso, no município de Igaratá, SP, na microbacia da Fazenda Santa Marta (Longitude 46°06'30"W; Latitude 23°10'22"S; altitude 745 m), com área total de 150 hectares, quantificando-se perdas de água e de sedimentos, pelo período de 12 meses, dentro do contexto de uso e ocupação do Vale do Rio Paraíba, com a seleção de três locais representativos das três coberturas existentes na área: eucalipto com idade de 5 anos, mata nativa e pastagem em regeneração, apresentando os solos Cambissolo Háplico, classificados em Tb Distrófico latossólico úmbrico (CX1) e Tb Distrófico latossólico A moderado (CX2), com valores de declividade de 12%; 6% e 8%, respectivamente. A precipitação pluviométrica foi de 1.373,65 mm no período.

De acordo com Gomes et al. (2019), uma comparação entre as perdas de água sob as três coberturas vegetais mostra que o valor mais elevado ocorreu na pastagem sobre o Cambissolo CX2, seguida pelo eucalipto sobre Cambissolo CX1, e o menor valor na mata nativa sobre Cambissolo CX2. Situação semelhante ocorre com as perdas de solos (sólidos em suspensão), sendo constatados os valores mais elevados na cobertura de pastagem, seguidos pelas coberturas de mata nativa e de eucalipto.

### **Impactos potenciais e efetivos gerados pelo projeto**

Como impacto potencial, verifica-se que a caracterização pedogeomorfológica, aliada a uma avaliação dos componentes geoambientais, tanto em escala regional quanto no âmbito de microbacia hidrográfica, possibilita uma visão integrada do ambiente, podendo subsidiar ações com vistas à sustentabilidade da cultura do eucalipto na região do Vale do Rio Paraíba do Sul, porção paulista.

Quanto ao impacto efetivo positivo, ressalta-se que cultivo do eucalipto mostrou ser uma prática que pode oferecer condições de sustentabilidade. Além disso, ficou evidenciado que esta cultura pode coexistir com a mata nativa, consorciada ou não, devendo-se observar as condições pedogeomorfológicas e a legislação vigente.

Em relação aos impactos efetivos negativos, temos que a pesquisa em âmbito de microbacia hidrográfica foi realizada em período de tempo relativamente curto, sendo recomendável a continuidade com outras atividades na mesma microbacia, e, a partir do estudo preliminar de perdas de água e de sedimentos sob três tipos de coberturas vegetais, na microbacia da Fazenda Santa Marta, foi verificado que os solos, de forma geral, impõem fortes restrições ao uso agrícola mais intensivo.

### **Contribuições**

As contribuições deste projeto estão relacionadas diretamente à desmistificação quanto ao impacto negativo da eucaliptocultura no meio ambiente, não podendo ser, de forma genérica, rotulada como causadora de desequilíbrios ambientais, tanto em termos de microbacia hidrográfica como em escala regional. Porém, se faz necessária a adoção de práticas de manejo e conservação para que a sustentabilidade do sistema de cultivo não seja comprometida, bem como para que sejam geradas bases de informações com registros mais longos, subsidiando avaliações mais precisas dos impactos positivos da cultura.

### **Projeto GeoHevea (Município de Planalto, SP – 2016–2017): cultivo intensivo de seringueira**

O cultivo da seringueira no estado de São Paulo remonta aos anos de 1970 a 1979, fruto de uma política pública formulada e conduzida pela Secretaria de Agricultura do Estado de São Paulo, com o objetivo de propor uma nova alternativa agrícola para os produtores paulistas, em substituição às culturas de menor rendimento, ou mesmo à agricultura de subsistência, que predominava no meio oeste do Estado (IAC, 1999, citado por Pino et al., 1997, p. 7). Assim, os seringais paulistas foram implantados e continuam concentrados no planalto ocidental do estado, principalmente nas regiões administradas pelos Escritórios de Desenvolvimento Rural (EDRs) de São José do Rio Preto, Barretos, General Salgado, Catanduva, Marília, Tupã e Votuporanga, locais que concentram aproximadamente 67% da área plantada.

Considerando esse cenário do cultivo da seringueira, também chamado de heveicultura, foi proposto um trabalho de pesquisa com o envolvimento de duas Unidades da Embrapa: Embrapa Monitoramento por Satélite (atual Embrapa Territorial) e Embrapa Meio Ambiente, denominado Projeto GeoHevea, com o objetivo de avaliar a sustentabilidade e possíveis impactos ambientais dessa cultura. Para esse trabalho, realizado no município de Planalto, que faz parte da microrregião de São José do Rio Preto, foi feita a caracterização pedogeomorfológica da área, com o objetivo de conhecer os compartimentos ambientais – solo, geologia e geomorfologia – sob três tipos de

cobertura vegetal, visando oferecer subsídios básicos para as análises e avaliações de possibilidades de uso das terras e seus eventuais impactos. A área experimental adotada levou em consideração três tipos de cobertura vegetal para efeito de comparação: seringueira, mata e pastagem (Pereira et al., 2017).

O solo dominante na região é o Latossolo Vermelho, segundo o mapeamento pedológico do Estado de São Paulo (Oliveira et al., 1999). Porém, com a necessidade de atualização e melhoria dos dados e das informações sobre a área experimental, foram feitos trabalhos de campo com abertura de trincheiras (perfis), descrição morfológica e coleta de amostras para análise em laboratório, conforme Pereira et al. (2017). A geologia regional é constituída por rochas sedimentares do Grupo Bauru, que abrange boa parte do oeste do Estado de São Paulo, Triângulo Mineiro e norte do Paraná. A geomorfologia regional é característica da Província do Planalto Ocidental, com domínio de colinas amplas e suaves que produzem um relevo colinoso, com baixas declividades, de até 15% (IBGE, 2000; Martinelli, 2009). Na área de estudo, o relevo é de suave a suave ondulado, declividade entre 1% e 3%, em média, com variações de até 5%, de acordo com observações dos autores deste trabalho. A caracterização físico-ambiental da área, representada pelo solo, geologia e geomorfologia, tem grande relevância, pois, além de permitir a análise geral da área, auxilia na identificação das potencialidades e/ou limitações de uso das terras.

Outra abordagem sobre a heveicultura envolveu estudos realizados em sub-bacias tributárias do Rio Tietê, localizadas no noroeste do Estado de São Paulo, nas regiões administrativas de São José do Rio Preto e Araçatuba, onde estão concentrados 73% dos pés de seringueira plantados e 67% dos pés em produção no estado, responsáveis por 69% da produção paulista de borracha em 2015 (Instituto de Economia Agrícola, 2016). Nesse contexto, o presente trabalho foi proposto com o objetivo de mapear as áreas cultivadas com seringueiras em sub-bacias do noroeste do Estado de São Paulo, entre as quais se inclui o município de Planalto, abordado no primeiro trabalho do Projeto GeoHevea, bem como de avaliar a perda de solo nessas áreas, considerando o uso atual (com seringueiras) e usos alternativos (cana-de-açúcar e pastagens), e, assim, subsidiar o planejamento do uso adequado dessas terras (Galvão et al., 2017).

A área de estudo compreende as sub-bacias do Ribeirão Santa Bárbara, Córrego da Arribada, Ribeirão São Jerônimo, Ribeirão dos Ferreiros ou das Oficinas, e três pequenas sub-bacias, cujas águas escoam diretamente na represa do Rio Tietê (Camargo et al., 2016). A área possui cerca de 174.183 ha e está localizada entre as latitudes 20°41'28,72" e 21°13'17,08"S, e entre as longitudes 50°08'45,91" e 49°39'21,96"W.

Foram avaliadas as perdas de solo considerando a situação instalada (cenário real), ou seja, com o cultivo da seringueira, e para dois cenários alternativos de uso dessas terras, um para o cultivo da cana-de-açúcar e outro para pastagens degradadas.

A estimativa do valor médio de perda de solo nas áreas cultivadas com seringueira foi de  $15,962 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Se as seringueiras fossem substituídas por pastagens degradadas, sem terraceamento, o valor médio da perda de solo passaria a ser de  $30,089 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Isso corresponderia ao incremento de 88,50% nas perdas de solo. Caso a substituição fosse pela cana-de-açúcar, sem terraceamento, o valor médio da perda de solo seria de  $90,186 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , ou seja, o incremento nas perdas de solo seria de 465,00%

A abordagem neste estudo foi essencialmente sobre o aspecto do risco de erosão hídrica do solo. O uso das terras pelos agricultores também leva em consideração vários aspectos, tais como tradição familiar, práticas culturais (técnicas de cultivo) e, principalmente, fatores econômicos.

### **Avaliação dos impactos potenciais e efetivos**

Como impactos potenciais positivos, destaca-se a adoção do cultivo de seringueira para outras áreas ou regiões, com ocorrência dos mesmos tipos de solos e relevo, facilitando a seleção de áreas para esse tipo de cultivo.

Como impactos efetivos positivos, tem-se o conhecimento mais específico sobre as perdas de solo em função das práticas conservacionistas aliadas à substituição da seringueira por outras culturas, tais como cana-de-açúcar e pastagem.

### **Contribuições**

A caracterização físico-ambiental da área contribuiu para:

- a. O conhecimento dos diferentes compartimentos geoambientais, que permite a análise geral da área e a identificação das potencialidades e/ou limitações de uso das terras;
- b. A avaliação do potencial agrícola dos solos da área, os quais oferecem boas condições para o uso agrícola;
- c. Os resultados obtidos indicaram, ainda, que a substituição dos atuais seringais da área de estudo por pastagens degradadas implicaria no aumento das taxas anuais de perda de solo.

Se fosse adotada a prática de terraceamento agrícola na substituição dos seringais pela cana-de-açúcar, as perdas de solo seriam menores, porém ainda superiores às taxas estimadas para a substituição por pastagens degradadas sem terraceamento. Já na hipótese de substituição dos seringais por pastagens de *Brachiaria brizantha*, com preparo do solo, adubação, calagem, plantio e manejo adequados, a taxa de perda de solo diminuiria, mesmo sem a adoção de práticas conservacionistas, como o terraceamento agrícola.

## MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA EM ÁREAS FRÁGEIS

### **Projeto Guarani (Botucatu), Fase I (1993–1997/1998): Impacto ambiental e implicações socioeconômicas da agricultura intensiva em água subterrânea**

O interesse em conhecer melhor a ocupação das áreas de recarga do Aquífero Guarani (Botucatu, até 1999) surgiu em decorrência da crescente demanda por água subterrânea, uma vez que as águas superficiais têm apresentado redução substancial em seu volume, além de exigirem custos mais altos de tratamento para consumo humano. Assim, no âmbito do Mercosul, ocorreu, no início dos anos 1990, uma mobilização de vários especialistas direcionada para a gestão sustentável do Aquífero Guarani, ainda denominado de Botucatu à época. Nesse contexto, foi desenvolvido um trabalho em áreas de recarga do Aquífero Guarani na microbacia do Córrego Espraiado, região de Ribeirão Preto, por pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente, no período 1993–1997/98. Tal trabalho possibilitou um ganho de conhecimento em relação a vários parâmetros físico-químicos relativos aos Neossolos Quartzarênicos e solos associados, bem como de alguns herbicidas neles aplicados. De fato, os estudos desenvolvidos ao longo de cinco anos na microbacia em questão revelaram a aplicação intensiva de agrotóxicos como Diuron, Ametrina, Tebuthiuron e Hexazinone.

Para efeito de análise, no entanto, foi selecionado somente o Tebuthiuron, por apresentar o maior potencial de lixiviação entre os quatro herbicidas citados. O ponto de amostragem considerado foi um poço semiartesiano, localizado na área de estudo, com aproximadamente 53 m de profundidade. O monitoramento da água e sua respectiva análise foram realizadas nos meses de outubro, novembro e dezembro de 1995, e bimestralmente de 1996 a 1998 (Gomes et al., 2001). Todavia, os níveis de Tebuthiuron encontrados ficaram abaixo daqueles considerados críticos pelo Ministério da Saúde do Brasil, Organização Mundial de Saúde, e pela EPA para os padrões de potabilidade.

Estudos de simulação do movimento vertical do Tebuthiuron também foram realizados na Microbacia do Córrego Espraiado, especificamente nas porções de recarga direta (Neossolos Quartzarênicos), cujos resultados indicaram que o produto oferece riscos para a água subterrânea (Pessoa et al., 1998; 1999). Porém, as conclusões dos trabalhos realizados indicaram a necessidade de estudos de comportamento deste herbicida por períodos mais prolongados, para confirmar o seu real potencial de contaminação da água subterrânea.

Em complemento aos estudos de ocorrência do Tebuthiuron na Microbacia do Córrego Espraiado, foram realizadas, ainda, avaliações da vulnerabilidade natural das áreas de recarga do Aquífero Guarani, como forma de auxiliar atividades futuras, visando à compreensão mais detalhada de alguns aspectos pedogeomorfológicos dessas áreas, como suporte ao uso racional e sustentável destas. Esse estudo foi realizado sobre os principais solos da microbacia do Córrego Espraiado, representados, então, pelo Latossolo Vermelho Eutroférico e Distroférico, na porção mais a montante, e pelos solos arenosos do tipo Latossolo Vermelho Distrófico psamítico e Neossolo Quartzarênico, na porção mais a jusante da área, sendo esta a porção representativa da recarga direta do Aquífero Guarani (Miklós; Gomes, 1996; Sistema brasileiro de classificação de solos, 1999).

Sobre os estudos de vulnerabilidade natural da área de recarga, foram levadas em consideração a classificação da condutividade hidráulica saturada dos solos e a declividade da área de ocorrência deles. A relação matricial entre as classes de condutividade hidráulica e de declividade resultou na classificação dos potenciais de infiltração e de escoamento superficial da água no solo (Gomes et al., 2002).

Nesse estudo foram consideradas as condições de lençol freático profundo a muito profundo para todos os solos, já que a zona saturada do Aquífero Guarani se encontra a aproximadamente 42 metros de profundidade na área estudada (a qual representa parte das chamadas “áreas de recarga” desse manancial subterrâneo).

Potencial de infiltração classificado como alto (em decorrência da alta condutividade hidráulica e da baixa declividade da área) indica alta vulnerabilidade à contaminação do compartimento água do lençol freático, com possibilidade de chegada do produto contaminante até os corpos d’água mais profundos ou à zona saturada. Como o lençol freático nessa avaliação foi substituído pela zona saturada do aquífero, esse parâmetro passou a ser neutro, e a ênfase transferida para a condutividade hidráulica do solo e a declividade do terreno.

Potencial de escoamento superficial classificado como alto, por sua vez, indica que a área é mais vulnerável à erosão e à contaminação dos corpos d’água superficiais por *run off* (Gomes et al., 2002).

### **Avaliação dos impactos potenciais e efetivos**

Como impactos potenciais positivos, tem-se a aplicação do conhecimento obtido sobre o herbicida Tebuthiuron para outras áreas semelhantes (recarga), com adoção de medidas preventivas seguras em relação aos riscos de contaminação da água subterrânea.

Como impactos efetivos positivos, destaca-se o conhecimento obtido sobre o comportamento deste herbicida, principalmente em solos arenosos, permitindo, assim, o seu uso de forma mais cautelosa, evitando riscos de contaminação do lençol freático, como também de corpos d'água mais profundos, como os aquíferos.

### **Contribuições**

O monitoramento do herbicida Tebuthiuron contribuiu, em parte, para o entendimento de seu movimento até a água subterrânea, mostrando que o fenômeno ocorre de forma relativamente rápida em solos arenosos, servindo, assim, de alerta para a necessidade de investigações mais detalhadas.

As características físicas dos solos da área estudada ressaltam a sua expressiva vulnerabilidade natural, que, aliada ao alto potencial de lixiviação e outras propriedades físico-químicas do herbicida Tebuthiuron, indicam uma situação de risco de potencial contaminação da água subterrânea.

Os resultados obtidos contribuem também para a tomada de decisão, de caráter preventivo ou mitigador, nas áreas de recarga de aquíferos sedimentares, e, ainda, servem como suporte na gestão do Aquífero Guarani, que inclui, entre outras propostas, um manejo agroambiental para as suas áreas de recarga.

### **Projeto Guarani (Botucatu), Fase II (1999 –2001): Caracterização das áreas de afloramento do Aquífero Guarani no Brasil**

A segunda fase do Projeto Guarani teve como foco principal a classificação das áreas de recarga direta do Aquífero Botucatu em domínios ambientais denominados pedomorfoagroclicmáticos, bem como a avaliação de riscos potenciais de contaminação das águas subterrâneas. Nesse trabalho considerou-se os levantamentos de solo, clima, topografia, vegetação natural, geologia/hidrogeologia, e, principalmente, os sistemas de produção agrícola dessas áreas, de acordo com a descrição das atividades, a seguir: a) Definição dos contornos das áreas de recarga do Aquífero Guarani em território brasileiro, tendo como referência os mapas-base do IBGE, na escala 1:250.000; b) Digitalização do mapa geológico de todas as áreas de recarga em território brasileiro na escala 1:250.000; c) Elaboração do quadro de riscos, que subsidiará a composição do mapa final de risco potencial de contaminação, para os estados de São Paulo, Goiás e Mato Grosso, considerando a integração dos dados de carga (quantidade do produto aplicada) e vulnerabilidade natural das áreas de recarga (Gomes; Filizola, 2002; Gomes et al., 2008). Ao todo, foram identificados oito domínios principais, de acordo com a descrição a seguir:

**Domínio pedomorfoagroclimático das áreas de recarga do Aquífero Guarani no estado de São Paulo (Planalto Médio Paulista – três Faixas).**

Esse domínio abrange cerca de 16.000 km<sup>2</sup>, ocupando uma faixa de norte a sul do estado, localizada na porção Centro-Oeste, inserido nas coordenadas 21° e 23° de Latitude Sul, e 47° e 50° de Longitude Oeste.

**Domínio pedomorfoagroclimático das áreas de recarga do Aquífero Guarani no estado de Minas Gerais (Borda Ocidental da Mantiqueira).**

Esse domínio ocupa cerca de 1.500 km<sup>2</sup>, a menor entre todos os estados que possuem áreas de recarga, abrangendo as coordenadas 20°00' e 21°20' de Latitude Sul, e 47° e 47°20' de Longitude Oeste.

**Domínios pedomorfoagroclimáticos das áreas de recarga do Aquífero Guarani no estado de Goiás (Nascentes do Araguaia).**

Em Goiás, essa área possui cerca de 15.000 km<sup>2</sup>, sendo que grande parte dela está distribuída ao longo da região das nascentes do Rio Araguaia, na divisa dos estados de Goiás e Mato Grosso, entre os paralelos 17°00' e 20°00'S e os meridianos 51°30' e 55°30'O.

**Domínios pedomorfoagroclimáticos das áreas de recarga do Aquífero Guarani na porção leste do estado de Mato Grosso (Nascentes do Araguaia).**

A área de afloramento nessa porção é de cerca de 9.000 km<sup>2</sup>, considerando a região de Alto Garças, e encontra-se sob a abrangência do Rio Araguaia, situada entre os paralelos 16°40' e 17°00'S, e os meridianos 53°30' e 54°00'O.

**Domínio pedomorfoagroclimático das áreas de recarga do Aquífero Guarani no estado de Mato Grosso do Sul (Alto Taquari).**

Essa área representa cerca de 33.000 km<sup>2</sup> e está localizada entre as latitudes 17°00' e 20°00'S e as longitudes 53°00' e 55°00'O, abrangendo em quase toda sua extensão a bacia hidrográfica do Alto Taquari.

### **Domínio pedomorfoagroclimático das áreas de recarga do Aquífero Guarani no estado do Paraná (Planalto Médio Paranaense).**

A área abrange cerca de 7.000 km<sup>2</sup>, distribuída ao longo de uma faixa estreita a oeste de Curitiba, com extensão de norte a sul.

### **Domínio pedomorfoagroclimático das áreas de recarga do Aquífero Guarani no estado de Santa Catarina (Planalto Médio Catarinense).**

A área desse domínio é de cerca de 5.000 km<sup>2</sup>, abrangendo os municípios da região de Lages. A porção de recarga no estado apresenta uma faixa bastante delgada, tendo em alguns locais menos de 1 km de largura.

### **Domínios pedomorfoagroclimáticos das áreas de recarga do Aquífero Guarani no estado do Rio Grande do Sul (Serra Gaúcha/Encosta inferior nordeste, Borda do Planalto Médio/Missões e Campanha).**

A área desse domínio possui cerca de 13.500 km<sup>2</sup>, distribuída ao longo de uma faixa delgada de leste a oeste do estado, com inflexão para o sul até a divisa com o Uruguai. Essa faixa encontra-se inserida nas coordenadas 29°00' e 30°00' de Latitude Sul, e 50°30' e 55°40' de Longitude.

A divisão das áreas de recarga em oito domínios auxilia, ainda que de forma preliminar, na escolha de porções potencialmente mais críticas, e mesmo para intervenção imediata naquelas identificadas como “piores casos”, já que são consideradas frágeis do ponto de vista ambiental. A classificação de riscos potenciais de contaminação para essas áreas, por exemplo, tem como suporte as informações obtidas a partir dos domínios em questão.

### **Impactos potenciais e efetivos gerados pelo projeto**

Como impactos potenciais positivos, destaca-se a contribuição para aplicação desses conhecimentos e técnicas utilizadas para outras regiões, de forma a ampliar o entendimento e compreensão das chamadas “áreas de recarga direta de aquíferos sedimentares”.

Quanto aos impactos efetivos, de caráter positivo, destaca-se a importância desses resultados como suporte à avaliação do Ordenamento Agroambiental, aplicado às áreas de recarga dos domínios: Nascentes do Araguaia (Divisas estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul) e Planalto Médio Paulista (Faixa Central – região de Ribeirão Preto, SP), descritos nas Tabelas 6.1 e 6.2.

## **Contribuições**

Subsidiar proposta de gestão ambiental para as áreas de recarga de aquíferos sedimentares, apoiada nas técnicas de Boas Práticas Agrícolas, com visão sustentável do ponto de vista agroambiental.

### **Projeto Guarani, Fase III (2002–2005): Ordenamento Agroambiental das Nascentes do rio Araguaia - cultivo de soja e pastagem em áreas de recarga do Aquífero Guarani e da Microbacia do Córrego Espraiado - cultivo intensivo de cana-de-açúcar**

A concepção do ordenamento agroambiental para a Microbacia do Córrego Espraiado, na região e Ribeirão Preto, SP, e para as Nascentes do Rio Araguaia, entre os municípios de Mineiros, GO, e Alto Taquarí, MT, fundamentou-se na integração das seguintes bases de informações: a) levantamento das características fisiográficas e de uso agrícola das áreas a serem estudadas; b) avaliação da vulnerabilidade natural; c) classificação da capacidade de uso das terras e determinação de áreas de conflito; c) qualificação e quantificação dos agrotóxicos de maior risco para a água subterrânea; d) realização de estudos de risco de contaminação da água subterrânea; e) identificação do perfil socioeconômico e cultural dos produtores localizados nas áreas de estudo (Gomes et al., 2008). Os resultados obtidos estão expressos nas tabelas 6.1 e 6.2, respectivamente, que exibem o Ordenamento Agroambiental das áreas de São Paulo (Microbacia do Córrego Espraiado) e de Goiás/Mato Grosso (Nascentes do Rio Araguaia).

## **Impactos potenciais e efetivos gerados pelo projeto**

Entre os impactos potenciais positivos, destaca-se a aplicação da proposta de ordenamento para outras regiões do país, principalmente no auxílio aos trabalhos de Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE).

Em relação aos impactos efetivos, considera-se a contribuição imediata do ordenamento para as duas regiões estudadas, tornando-as ambientalmente mais equilibradas, e um instrumento promissor de gestão agroambiental.

### **Contribuições**

O Ordenamento Agroambiental das áreas de recarga do Aquífero Guarani em território brasileiro tem o objetivo dar subsídios a diversas ações voltadas para a sustentabilidade de áreas frágeis ou de alta vulnerabilidade natural. As informações constantes das Tabelas 6.1 e 6.2, de acordo com Gomes et al. (2008), permitem uma visão de como usar racionalmente áreas com tais características, servindo de suporte para a elaboração de um documento orientador direcionado à formulação de políticas públicas, a partir de um conjunto de medidas que inclui as Boas Práticas Agrícolas, ajustadas para cada domínio pedomorfoagrocliclimático.

Tabela 6.1. Proposta de ordenamento agroambiental a partir da integração entre aptidão agrícola e vulnerabilidade natural dos solos da microbacia do córrego Espriatado, região de Ribeirão Preto, SP.

Material de origem (geologia)	Classe de Solo	Aptidão Agrícola <sup>1</sup>	Vulnerabilidade <sup>2</sup>	Ordenamento Agroambiental
Basaltos (Fm Serra Geral)	Latossolos Vermelhos Eutroférricos (LVef)	1Bc	Baixa/Média	Solos adequados para cultivo anual (Ca), com adoção do sistema de controle biológico de pragas e doenças (cbpd). Recomenda-se cultivo com alternância ou rotação (Rc) de espécies leguminosas e gramíneas – Ca <sub>(cbpd)</sub> + (Rc).
	Latossolos Vermelhos Distroférricos e Acriférricos (LVdf/wf)	2bc		
Basaltos (Fm Serra Geral) + Arenitos (Formação Botucatu) em menor proporção	Latossolos Vermelho-Amarelos Distroférricos/Alícos Argilosos (LVAdb/ab)			Podem ser usados também para culturas semi-perenes (Csp) e culturas perenes (Cp). Recomenda-se, nesses casos, um controle rígido dos defensivos agrícolas utilizados.
Basaltos (Fm Serra Geral) + Arenitos (Formação Botucatu) em proporções semelhantes	Latossolos Vermelhos Distroférricos/Alícos psamíticos (LVdq/aq)		Média/Alta	Solos adequados para cultivo anual com adoção do sistema de controle biológico de pragas e doenças – Ca(cbpd) integrado a pastagem plantada (Pp) – ou sistema integrado lavoura/pecuária (L <sub>ip</sub> ), além de outros que minimizem a entrada de insumos agrícolas.
Basaltos (Fm Serra Geral)	Nitossolos Vermelhos Eutroférricos (NVef)	2b(c)	Muito Baixa/Baixa	Solos adequados para atividades de olericultura e agricultura de subsistência – (O) + (A).
Basaltos (Fm Serra Geral)	Neossolos Litólicos Eutroférricos/Distroférricos (RLe/d)	6ff	Nula/Muito Baixa	Solos adequados para cobertura de vegetação natural – Áreas de Preservação Permanente (APP). Nesse caso, deve-se considerar as APP e o tipo de vegetação conforme o ambiente local (ex: várzeas, escarpas, nascentes etc.).
	Material detrito-laterítico retrabalhado (TQdl)	6FF	Alta/Muito Alta	
Arenito (Fm Botucatu)	Neossolo Quartzarênico (RQoa/d)	5(n)	Alta	Solos adequados para cobertura de vegetação natural de porte médio (típicos do ambiente intermediário das vertentes) integrada com pastagem plantada – (APP) + (Pp).

<sup>1</sup>Bc: Classe 1, com aptidão boa para lavoura no nível de manejo B, e regular no nível de manejo C; 2bc: Classe 2, com aptidão regular para lavoura nos níveis de manejo b e c; 2(b)c: Classe 2, com aptidão regular no nível de manejo C, e restrito no nível B; 2b(c): Classe 2, com aptidão agrícola regular nos níveis de manejo B, e restrito em C; 5(n): Classe 5, com aptidão agrícola restrita para pastagem natural e inapta para silvicultura; 6: Classe off, sem aptidão agrícola, mas com aptidão regular para fauna e flora; 6FF: aptidão boa para fauna e flora.

<sup>2</sup> nula (0% exposição ao risco de contaminação do lençol freático ou o nível de base do curso d'água); muito baixa (0% a 10%), baixa (10% a 20%), média (20% a 40%); alta, (40% a 60%); muito alta (> 60%).

**Tabela 6.2.** Proposta de ordenamento agroambiental a partir da integração entre aptidão agrícola e vulnerabilidade natural dos solos das nascentes do rio Araguaia, GO/MT.

Material de origem (geologia)	Classe de Solo	Aptidão Agrícola <sup>1</sup>	Vulnerabilidade <sup>2</sup>	Ordenamento Agroambiental
Basaltos (Fm Serra Geral) + arenitos e calcários da Formação Bauru	Latossolos Vermelhos Distróficos típicos (LVd)	1bC	Muito Baixa/Baixa	Solos adequados para cultivo anual (Ca), com adoção do sistema de controle biológico de pragas e doenças (cbpd). Recomenda-se cultivo com alternância ou rotação (Rc) de espécies leguminosas e gramíneas – Ca <sub>(cbpd)</sub> + (Rc).
	Latossolos Vermelhos Acrícos típicos (LVw)	2(b)c		Podem ser usados também para culturas semi-perenes (Csp) e culturas perenes (Cp). Recomenda-se, nesses casos, um controle rígido dos defensivos agrícolas utilizados.
Basaltos (Fm Serra Geral) + Arenitos da Formação Botucatu.	Latossolos Vermelho- amarelos Distróficos psamíticos (LVAdq)		Média/Alta	Solos adequados para cultivo anual com adoção do sistema de controle biológico de pragas e doenças – Ca <sub>(cbpd)</sub> integrado a pastagem plantada (Pp) – ou sistema integrado lavoura/pecuária (I <sub>lp</sub> ), além de outros que minimizem a entrada de insumos agrícolas.
	Plintossolos Pétricos Concrecionários Distróficos (FFcd)	6	Nula/Muito Baixa	Solos adequados para cobertura de vegetação natural – Áreas de Preservação Permanente (APP). Nesse caso, deve-se considerar as APP e o tipo de vegetação conforme o ambiente local (ex: várzeas, escarpas, nascentes etc.).
Arenito (Fm Botucatu)	Neossolos Flúvicos Psamíticos (RUq)		Alta/Muito Alta	
Arenito (Fm Botucatu)	Neossolos Quartzarênicos (RQoa/d)	4p	Alta	Solos adequados para cobertura de vegetação natural de porte médio (típicos do ambiente intermediário das vertentes) integrada com pastagem plantada – (APP) + (Pp).

<sup>1</sup> 1bC: Classe 1, com aptidão boa para lavoura no nível de manejo C (altamente tecnificado), e regular no nível de manejo B; 2 (b)c: Classe 2, com aptidão boa no nível de manejo C, e restrito no nível B; 2ab(c): Classe 2, com aptidão agrícola regular nos níveis de manejo A e B, e restrita no nível C; 4p: Classe 4, com aptidão agrícola regular para pastagem plantada; 6: Classe 6, sem aptidão agrícola.

<sup>2</sup> nula (0% exposição ao risco de contaminação do lençol freático ou o nível de base do curso d'água); muito baixa (0% a 10%); baixa (10% a 20%); média (20% a 40%); alta (40% a 60%); muito alta (> 60%).

## Perdas de sedimento e água sob pastagem em áreas de alta declividade em uma sub-bacia hidrográfica em Extrema, MG.

A sub-bacia do Ribeirão das Posses ocupa área de 1.196,7 hectares no Município de Extrema, MG, e possui vertentes de elevada declividade. Este ribeirão é um dos afluentes do Rio Jaguari, que abastece o Sistema Cantareira e compõe a rede de drenagem da bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (bacias PCJ). Além disso, a sub-bacia do Ribeirão das Posses, ao lado de outras sub-bacias no município de Extrema, é alvo de um programa pioneiro no país para pagamento por serviços ambientais hídricos (Jardim; Bursztyn, 2015). Nesse contexto, a Embrapa Meio Ambiente e seus parceiros desenvolveram um projeto de pesquisa com o monitoramento da qualidade das águas do Ribeirão das Posses, com o objetivo de avaliar a resposta das ações de recuperação ambiental implementadas nessa bacia e conduzidas pelo referido Programa (Figueiredo et al., 2021). Tal pesquisa também envolveu estudos sobre as perdas de água e de solo (transporte de sedimentos) por escoamento superficial em uma vertente próxima à nascente principal do Ribeirão das Posses (Gomes et al., 2017; 2021a; 2021b). Essa vertente, definida como uma topossequência (sequência de pontos estudados em uma encosta), possui declividade variável entre 19% e 55%, com dois tipos de cobertura vegetal: floresta com 10% da área e pastagem com o restante (90%). Os solos são representados por Cambissolos Húmicos (CHe e CHd), Argissolos Câmbicos (PVAd) e Neossolos Litólicos (RLd), de acordo com Gomes et al. (2017) e Santos et al. (2018).

Os resultados obtidos, de acordo com os dados da Tabela 6.3, revelam que, sob cobertura de floresta, os Cambissolos (CHe) apresentam perdas bem inferiores quando comparadas à cobertura de pastagem em Argissolos e Neossolos. A exceção é o Cambissolo CHd, que apresenta pouca diferença em relação ao CHe, particularmente em relação às perdas de água, cujos valores correspondem a  $392 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  e  $380 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , respectivamente. No caso dos sedimentos, os valores de perdas exibem diferenças maiores, com  $4,7 \text{ kg ha}^{-1}$  para o Che, e  $7,1 \text{ kg ha}^{-1}$  para o CHd, o que mostra a proteção da floresta em relação ao transporte de sedimentos, já que os solos são semelhantes (Gomes et al., 2017, 2021b).

Visando ao melhor entendimento em relação às considerações feitas por Gomes et al. (2017), os parâmetros/atributos (Declividade, Condutividade hidráulica não saturada (K), Densidade do solo, Argila, Areia, Silte e Matéria orgânica) foram reavaliados por Gomes et al. (2021b), de acordo com a Tabela 6.3, a partir da interação entre eles, com uma matriz de correlação por meio do cálculo do coeficiente de correlação linear de Pearson (Lira, 2004).

**Tabela 6.3.** Declividade (D%) da toposequência, com os parâmetros Condutividade hidráulica não saturada (K), Densidade do solo (Ds), Argila (ARG), Areia (A), Silte (S) e Matéria orgânica (MO), obtidos pela média entre as profundidades: 0 cm – 20 cm e de 20 cm – 40 cm, e valores de perdas de água e de sedimentos por hectare.

Solo	D (%)	K (cm h <sup>-1</sup> )	Ds (g cm <sup>-3</sup> )	Argila (g kg <sup>-1</sup> )	Areia (g kg <sup>-1</sup> )	Silte (g kg <sup>-1</sup> )	MO (g kg <sup>-1</sup> )	Perdas Água (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	Perdas Sedimento (kg ha <sup>-1</sup> )
CHe	55	3,39	1,1	560	190	250	158,07	380,09	4,71
CHd	53	3,25	1,2	550	180	270	147,04	392,49	7,10
PVA1	35	1,51	1,5	540	220	240	118,38	437,25	14,42
PVA2	23	1,85	1,4	510	240	250	105,26	509,95	14,96
RL1	21	0,96	1,6	480	290	230	109,83	948,03	20,19
RL2	19	0,85	1,8	470	260	270	96,40	901,22	23,31

Fonte: Adaptado de Gomes et al. (2017, 2021b).

Na reavaliação dos dados obtidos por Gomes et al. (2017), foi confirmado que o tipo de solo e seus atributos K, Ds, Argila, Areia, e MO influenciam as perdas de água e de sedimentos em suspensão, ficando a declividade (D%) em segundo plano. Os exemplos dessa condição são os solos CHe (mata) e CHd (pastagem), que, mesmo estando sob coberturas distintas e condições de declividade elevadas, da ordem de 55% e 53%, respectivamente, apresentam menores perdas, tanto de água quanto de sedimentos, em comparação com os Argissolos e Neossolos Litólicos, situados em posições de menor declividade na toposequência estudada. No caso específico destes solos, os valores maiores de densidade (Ds), aliados aos baixos teores de matéria orgânica (MO), como também aos baixos teores de argila, influenciaram no aumento das perdas de água e de sedimentos. Os valores elevados de densidade do solo (Ds), indicam que as áreas de pastagem com declividade de até 35% necessitam de uma reavaliação das práticas de uso para tornarem a infiltração e percolação da água ou condutividade hidráulica não saturada (K) satisfatórias e, assim, reduzirem as perdas por escoamento superficial. Entre as principais conclusões desse estudo, de acordo com Gomes et al. (2017, 2021a), está o manejo adequado dos solos dessa sub-bacia, que, assim, atuarão na provisão dos serviços ecossistêmicos como “reservatório e filtro de água”, favorecendo a conservação do solo e contribuindo para o aumento da vazão do Rio Jaguari.

### Impactos potenciais e efetivos gerados pelo projeto

Entre os impactos potenciais positivos, destaca-se a possibilidade dos comportamentos dos dois Cambissolos Húmicos ocorrerem em toda a sub-bacia estudada,

uma vez que, mesmo em condições de alta declividade, tais solos exibem baixas perdas de água e de sedimentos por *run off*.

Sobre os impactos potenciais negativos, há a possibilidade de aumento de perdas de sedimentos nos Argissolos e Neossolos Litólicos na área estudada e em toda a sub-bacia do Ribeirão das Posses, se forem adotadas as mesmas práticas de manejo do solo atuais.

Em relação aos impactos efetivos positivos, destacam-se os comportamentos dos Cambissolos Húmicos eutrófico e distrófico, que, mesmo em locais de alta declividade, apresentam baixas perdas de água e de sedimentos por *run off*.

Entre os impactos efetivos negativos, destaca-se o aumento de perdas de solos/sedimentos nos Argissolos e Neossolos Litólicos na topossequência estudada.

### Contribuições

Os estudos realizados mostram que o manejo do solo com adoção das práticas conservacionistas disponíveis, orientadas pelos atributos físicos dos solos, não apenas contribuem para a redução das perdas de água e de sedimentos por escoamento superficial, como também favorece o recarregamento do lençol freático, proporcionando assim o aumento do volume de água da sub-bacia estudada.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O manejo e a conservação do solo e da água no ambiente agrícola é de fundamental importância para a manutenção da produtividade, como também da sustentabilidade do sistema agroambiental.

Os resultados de diversos trabalhos de pesquisa aqui apresentados, desenvolvidos diretamente ou com a participação da Embrapa Meio Ambiente, evidenciam a importância de que a conservação, tanto do solo quanto da água, deve se fundamentar nas práticas vegetativas, edáficas e mecânicas, preconizadas e embasadas na literatura específica sobre o tema.

## REFERÊNCIAS

- ARTAXO, P. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. *Estudos Avançados*, v. 34, n. 100, p. 53-66, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/so103-4014.2020.34100.005>.
- CAMARGO, A. A.; GALDINO, S.; QUARTAROLI, C. F. Delimitação de bacias hidrográficas utilizando modelo digital de terreno gerado a partir de mapas topográficos e imagens de alta resolução espacial. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA 10., 2016, Campinas. *Anais...* Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2016. p. 1-11.
- DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L. de; BALIEIRO, F. de C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; ARAUJO FILHO, J. C. de; SANTOS, F. C. dos; ALBUQUERQUE, M. R. de; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, n. 9, p. 1003-1020, 2016.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos - SiBCS. 5.ed. (Revisada e ampliada). Brasília: Embrapa Solos, 2018. 356p.
- FIGUEIREDO, R. de O.; SIMIOLI, M. M.; JESUS, T. V. U. C.; CRUZ, P. P. N. da; SILVA, G. B. S. da; NOGUEIRA, S. F.; GREEN, T. R.; CAMARGO, P. B. de. Hydrobiogeochemistry of two catchments in Brazil under forest recovery in an Environmental Services Payment program. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 193, article 3, 2021. p. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08773-6>.
- FILIZOLA, H. F.; FONTANA, A.; DONAGEMMA, G. K.; SOUZA, M. D. de; BORTOLON, E. S. O.; BORTOLON, L. **Qualidade física de solos influenciada pelo uso e manejo na região de Guarai-TO.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2017. 34 p. il. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 72).
- FILIZOLA, H. F.; FERRACINI, V. L.; SANS, L. M. A.; GOMES, M. A. F.; FERREIRA, C. J. A. Monitoramento e avaliação do risco de contaminação por pesticidas em água superficial e subterrânea na região de Guaira. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, n. 5, p. 659-667, 2002.
- GALDINO, S.; QUARTAROLI, C. F.; TOSTO, S. G.; GOMES, M. A. F.; PEREIRA, L. C.; SOUZA, M. D. de; CAMARGO JÚNIOR, A. A. **Modelagem espacial da erosão do solo para diferentes usos da terra em áreas cultivadas com seringueiras em sub-bacias do noroeste do Estado de São Paulo.** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2017. 16 p. (Embrapa Monitoramento por Satélite. Documentos, 120).
- GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F. **Uso agrícola das áreas de afloramento do Aquífero Guarani e implicações na qualidade da água subterrânea.** Jaguariúna: [s. n.], 2002. 32 p. (Relatório de projeto).
- GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F.; CHAIM, A.; PAULA, M. M. de; CABALALL, M. R.; SOUZA, M. D. de; DIOGO, A. **Boas práticas agrícolas para as áreas de nascentes do rio Araguaia-GO/MT: controle de processos erosivos e aplicação otimizada de defensivos agrícolas.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 6 p. (Embrapa Meio Ambiente. Comunicado Técnico, 38).
- GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F.; SPADOTTO, C. A.; PEREIRA, A. S. Caracterização pedomorfoagrolimática das áreas de afloramento do Aquífero Guarani no Brasil: base para uma proposta

de gestão sustentável. In: GOMES, M. A. F. (ed.). **Uso agrícola das áreas de afloramento do Aquífero Guarani no Brasil: implicações para a água subterrânea e propostas de gestão com enfoque agroambiental**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2008. p. 47-64.

GOMES, M. A. F.; PEREIRA, L. C.; FIGUEIREDO, R. de O.; TÔSTO, S. G. **Perdas de água e de sedimentos em uma topossequência sob as coberturas de pastagem e de mata nativa na sub-bacia do Ribeirão das Posses, município de Extrema, MG**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2017. 12 p. (Embrapa Monitoramento por Satélite. Comunicado Técnico, 41).

GOMES, M. A. F.; PEREIRA, L. C.; PEREIRA, A. S.; PAZIANOTTO, R. A. A. **Aspectos geoambientais da eucaliptocultura no Vale do Paraíba Paulista**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2019. 28 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 118).

GOMES, M. A. F.; PEREIRA, L. C.; TÔSTO, S. G.; FIGUEIREDO, R. O.; GALDINO, S.; QUARTAROLI, C. F. **Perdas de água e de sedimentos em uma sub-bacia como contribuição à análise de serviços ambientais, Extrema, MG**. *Revista Terceira Margem Amazônia*, v. 6, n. especial 16, p. 127-137, 2021a. DOI: <http://dx.doi.org/10.36882/2525-4812.2021v6i16.ed.esp.p127-137>.

GOMES, M. A. F.; PEREIRA, L. C.; TÔSTO, S. G.; PAZIANOTTO, R. A. A. **Atributos de solos e suas relações com as perdas de água e de sedimentos por escoamento superficial em Extrema/MG**. 2021b. In: SEABRA, G. (org.). **Terra: vulnerabilidades e riscos ecológicos**. Ituiutaba: Barlavento, 2021b. p. 1206-1216.

GOMES, M. A. F.; SPADOTTO, C. A.; LANCHOTTE, V. L. **Ocorrência do herbicida tebuthiuron na água subterrânea da microbacia do córrego espraçado, Ribeirão Preto - SP**. *Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, v. 11, p. 65-76, 2001.

GOMES, M. A. F.; SPADOTTO, C. A.; PESSOA, M. C. P. Y. **Avaliação da vulnerabilidade natural do solo em áreas agrícolas: subsídio à avaliação do risco de contaminação do lençol freático por agroquímicos**. *Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, v. 12, p. 169-179, 2002.

GONÇALVES, J. R. P.; RAMOS, N. P.; FILIZOLA, H. F.; ANDRADE, C. A. de; PACKER, A. P.; VIEIRA, H. B. **Fertilidade de solos cultivados com cana de açúcar em sistema plantio direto por diferentes períodos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Ciência do solo: para quê e para quem: anais**. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. 4 p.

IBGE. **Atlas nacional do Brasil**. Rio de Janeiro, 2000.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Estatísticas da produção paulista**. Disponível em: [http://ciagri.iea.sp.gov.br/niai/subjectiva.aspx?cod\\_sis=1&idioma=1](http://ciagri.iea.sp.gov.br/niai/subjectiva.aspx?cod_sis=1&idioma=1). Acesso em: 14 nov. 2016.

JARDIM, M. H.; BURSZTYN, M. A. **Pagamento por serviços ambientais na gestão dos recursos hídricos: o caso de Extrema (MG)**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 20, n. 3, p. 353-360, 2015.

LIRA, S. A. **Análises de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações**. 2004. 209 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MANUAL de boas práticas agrícolas e sistema APPCC. Brasília, DF: CampoPAS: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 99 p. (Qualidade e Segurança dos Alimentos).

MARTINELLI, M. Relevo do Estado de São Paulo. *Confins*, v. 7, 2009. Disponível em: <http://confins.revues.org/6168>. Acesso em: 18 abr. 2017.

MESQUITA, M. da G. B. de F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ciência Rural*, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.

MIKLÓS, A. A. W.; GOMES, M.A.F. **Levantamento semi-detalhado dos solos da Bacia Hidrográfica do Córrego Espraiado, Ribeirão Preto-SP**. Jaguariúna: [s. n.], 1996. 48 p. (Relatório de Consultoria).

MORAES, G. de C.; ROSSI, P.; PIRES, A. M. M.; ROSSETTO, R.; RAMOS, N. P. Impacto do manejo da palhada sobre sua decomposição em área cultivada com cana-de-açúcar no município de Guaiúra-SP. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 8., 2014, Campinas. *Anais...* Campinas: Instituto Agronômico, 2014. RE Nº 14414. 8 p.

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSI, M.; BRAZ-CALDERANO, F. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida**. Campinas: Instituto Agronômico; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 64 p.

PEREIRA, L. C.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. de; TOSTO, S. G. **Caracterização físico-ambiental de uma área experimental no município de Planalto-SP**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2017. (Embrapa Monitoramento por Satélite. Comunicado Técnico, 42).

PESSOA, M. C. P. Y.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. de; CERDEIRA, A. L.; NICOLELLA, G.; MONTICELLI, A. Simulação do movimento de herbicidas utilizados no monocultivo de cana-de-açúcar em latossolos da área de recarga do Aquífero Botucatu (Guarani) em Ribeirão Preto, SP. *Revista Científica Rural*, v. 4, n. 1, p. 15-24, 1999

PESSOA, M. C. P. Y.; GOMES, M. A. F.; SOUSA, M. D. de; NICOLELLA, G.; CERDEIRA, A. L.; MONTICELLI, A. Simulação do movimento de herbicidas utilizados no monocultivo de cana-de-açúcar em areia quartzosa da área de recarga do Aquífero Guarani (antigo Botucatu) em Ribeirão Preto, SP. *Revista Científica Rural*, v. 3, n. 2, p. 11-19, 1998.

PINO, F. A.; FRANCISCO, V. L. F. dos S.; TORRES, A. J.; LORENA NETO, B.; CASER, D. V.; BIRAL, M. A. de M. (org.). **Levantamento censitário de unidades de produção agrícola do Estado de São Paulo**. São Paulo: IEA: CATI, 1997. 4 v.

PRADO, R. B.; FIDALGO, E. C. C.; FERREIRA, J. N.; CAMPANHA, M. M.; VARGAS, L. M. P.; MATTOS, L. M. de; PEDREIRA, B. da C. C. G.; MONTEIRO, J. M. G.; TURETTA, A. P. D.; MARTINS, A. L. da S.; DONAGEMMA, G. K.; COUTINHO, H. L. da C. Pesquisas em serviços ecossistêmicos e ambientais na paisagem rural do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 8, p. 610-622, 2015. Número especial IV SMUD.

RODRIGUES, G. S.; IRIAS, L. J. M. **Considerações sobre os impactos ambientais da agricultura irrigada**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. 7 p. (Embrapa Meio Ambiente. Circular Técnica, 7).

ROSSETTO, R.; VITTI, A. C.; PEREIRA, M. G. **Cana de açúcar: cultivo e sustentabilidade**. Piracicaba: Ipn, 2013. 13 f.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SISTEMA Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

VALARINI, P. J.; FRIGHETTO, R. T. S.; TOKESHI, H.; MORSOLETO, R. V. **Desenvolvimento de método e indicadores de avaliação do impacto ambiental das práticas de manejo em sistemas de produção intensivos**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 24 p. - (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 36).

# MONITORAMENTO AMBIENTAL E MANEJO PRODUTIVO E SANITÁRIO DA AQUICULTURA

*Julio Ferraz de Queiroz, Márcia Mayumi Ishikawa, Mariana Silveira Guerra Moura e Silva, Marcos Eliseu Losekann, Fernanda Garcia Sampaio, Hamilton Hisano, Ricardo Borghesi, Geraldo Stachetti Rodrigues, Maria Conceição Peres Young Pessoa, Célia Maria Doria Frasca-Scorvo, João Donato Scorvo Filho, João Manoel Cordeiro Alves, Claudio Martín Jonsson, Vera Lucia Scherholz Salgado de Castro, Vera Lúcia Ferracini, Sonia Claudia do Nascimento de Queiroz, Alfredo José Barreto Luiz, Ana Lúcia Penteado e Ana Paula Contador Packer*

## INTRODUÇÃO

A proteína animal mais consumida mundialmente é o pescado, tanto produzido em cativeiro quanto da pesca (extrativa). Conseqüentemente, o aumento da demanda por pescados para alimentação humana e a estagnação da captura pesqueira são as principais razões que têm motivado os produtores de peixes (piscicultores) a aumentarem sua escala de produção, otimizarem o uso dos recursos naturais e se dedicarem a atender consumidores que preferem adquirir alimentos produzidos por meio de métodos sustentáveis (Boyd et al., 2006; Queiroz et al., 2007a; Boyd; Queiroz, 2013).

A aquicultura, como atividade de produção de organismos aquáticos, vem crescendo no Brasil em um ritmo de aproximadamente 6,0% ao ano, ultrapassando 860 mil toneladas em 2022 (Associação Brasileira de Piscicultura, 2023). O Brasil possui um enorme potencial para expandir essa produção, devido à grande disponibilidade de água, às condições climáticas favoráveis e à presença de várias espécies de peixes adequadas para a produção em diferentes sistemas e tipos de ambientes. Nesse sentido, a importância da adoção de tecnologias disruptivas para aproveitar o potencial brasileiro para produção de organismos aquáticos e gerar uma verdadeira revolução azul vem sendo ressaltada (Valenti et al., 2021).

Nos últimos 40 anos, a Embrapa fortaleceu a pesquisa em aquicultura aumentando seu quadro de pesquisadores e parceiros, bem como, criando uma linha temática estratégica para a empresa. Desse modo, desenvolveu várias ações com o objetivo de assumir a Coordenação Nacional de P&D na área de aquicultura. Ressalta-se, ainda, que desde a época do extinto Plano Nacional de Pesquisa de Recursos Pesquei-

ros (PNP/RP) a Embrapa vem implementando projetos na área de aquicultura junto às demais instituições integrantes do Sistema Nacional de Pesquisa Agropecuária (SNPA). A partir de 1993, foram elaboradas propostas de projetos de desenvolvimento interministeriais e assinados protocolos de intenções referentes ao Projeto Interministerial para o Desenvolvimento da Carcinicultura na Região Nordeste (Proine, 1988); Proposta de criação e implantação do Centro Nacional de Pesquisa em Aquicultura e Recursos Pesqueiros no Estado do Rio Grande do Norte (CPARP, 1993), Proposta do Programa Nacional de P&D na área de Aquicultura e Proposta para a Implantação de um Centro Nacional de Pesquisa em Aquicultura, através da incorporação pela Embrapa da infraestrutura do CEPTA/Ibama em Pirassununga/São Paulo (1999).

A Embrapa Meio Ambiente vem desde 1998 conduzindo projetos de PD&I para contribuir com o desenvolvimento sustentável da aquicultura no Brasil e no exterior. Dentre eles, destacam-se os projetos desenvolvidos em conjunto com a Auburn University (AU), United States Department of Agriculture (USDA), United States Environmental Protection Agency (Usepa), Oregon State University/Colaborative Research Support Program (CRSP), World Wildlife Foundation (WWF), World Bank, Global Aquaculture Alliance (GAA), Alabama Catfish Producers Association (ACPA), e também com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Secretaria de Aquicultura e Pesca (Mapa/SAP), Ministério do Meio Ambiente (MMA), Agência Nacional de Águas (ANA), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP, Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios-Instituto de Pesca e APTA Regional do Leste Paulista (Monte Alegre do Sul), Universidade Estadual de Campinas, Universidade Estadual Paulista, Universidade Federal de São Carlos, contando com suporte da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe).

A participação da Embrapa Meio Ambiente e das suas instituições parceiras contribuiu diretamente para a elaboração da proposta do Programa Nacional de P&D e da Criação do Centro Nacional de Pesquisa na área de Aquicultura em Palmas, TO, a partir das seguintes ações: coordenação de grupos de trabalho interinstitucionais, realização de reuniões técnicas regionais em vários estados com a participação de pesquisadores e professores da área de aquicultura; elaboração de documentos técnicos para encaminhar o tema Aquicultura para a Diretoria Executiva da Embrapa no âmbito do “Programa de Pesquisa Estratégico e Prioritário da Embrapa” e definição da sua articulação no âmbito do SEP; identificação das demandas de pesquisa em aquicultura para subsidiar a elaboração do Projeto Especial de P&D em Aquicultura que serviu de base para institucionalizar o tema no âmbito da Embrapa, em articulação com o CNPq, e com o objetivo de propor Projetos Plataforma dentro das normas

do órgão financiador; definição dos procedimentos para repasse de recursos financeiros para Universidades e empresas de pesquisa líderes dos projetos de pesquisa em aquicultura financiados pela Embrapa; elaboração da Plataforma Tecnológica para apoiar o Desenvolvimento Sustentável da Carcinicultura Marinha em parceria com a Associação dos Criadores de Camarão (ABCC); e entrega do Projeto Estratégico de P&D em Aquicultura para a Diretoria Executiva da Embrapa.

A participação de pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente e das instituições parceiras nos seguintes projetos merecem menção: Ecoágua (SEG 11.1999.140) - Indicadores físico-químicos e biológicos de qualidade de água e de sedimentos; Indicadores diretos de serviços ambientais (SEG 01.03.01.001.006.09) - Formulação e validação do sistema de avaliação ponderada de impacto ambiental das atividades rurais nos pólos pioneiros do Proambiente (APOIA-Proambiente), Gestão ambiental das atividades produtivas nos estabelecimentos rurais do Proambiente a partir do Sistema Apoia-Proambiente; Ecopeixe Fase I (SEG 02.02.02.003.00.00) - Competitividade e sustentabilidade da aquicultura: Avaliação ambiental e sócio econômica; Rurbano III (Projeto Temático Fapesp - Subprojeto 10) - Avaliação do impacto ambiental e características socioeconômicas de algumas atividades do novo rural brasileiro; AquaBrasil - Bases tecnológicas para o desenvolvimento da aquicultura no Brasil (SEG 01.06.01.003.00.00); PAD (informalmente conhecido como Água Doce) (SEG 06.07.00.002.00.00) - Busca de indicadores para construção dos mecanismos de sustentabilidade ambiental como garantia de manutenção de unidades demonstrativas em 11 comunidades do semiárido brasileiro, que teve por foco as ações de P&D&T de tecnologias de convivência com o semiárido para o fortalecimento das unidades produtivas do Programa Água Doce do Governo Federal (à época do Ministério do Meio Ambiente) e a proposição de sistemas integrados de produção e uso múltiplo da água; CS-Piscicultura (SEG 02.07.01.013.00.00) - Índice de desempenho sustentável para a cadeia de suprimentos da piscicultura continental, que também realizou o mapa da cadeia de suprimentos e propôs indicadores de sustentabilidade; RESA (SEG 03.07.09.034.00.00) - Agregação de valor ao resíduo salino oriundo de tanques de produção de peixes na região do semi-árido; Ecopeixe Fase II (SEG 03.08.00.003.00.00) - Proposição e validação de boas práticas de manejo (BPM) para gestão ambiental da aquicultura; CNPMA-Reuso (SEG 03.10.05.012.00.00) - Sistema integrado para produção de peixes e agricultura familiar com reuso da água de escoamento superficial e tratamento com biofiltros do tipo leitos cultivados; Nanotox (SEG 03.11.00.001.00.00) - Avaliação dos efeitos tóxicos de nano-tio2 em peixes; TESTOXEFLU (SEG 03.12.00.039.00.00) - Testes toxicológicos na avaliação de um sistema de leitos cultivados para efluentes de aquicultura; Aquisys (conhecido informalmente como MP3 Validação Aquisys) (SEG 03.12.03.014.00.00) - Validação do sistema informatizado para a gestão ambiental da aquicultura com base em

Boas Práticas de Manejo (BPM) com foco em tilapicultura - Aquisys; Bioqua (SEG 03.13.09.008.00.00) - Uso de bioindicadores para avaliação da qualidade da água no cultivo da tilápia; TOXHERBPEI (SEG 03.12.00.036.00.00) - Alterações bioquímicas, hematológicas e acúmulo em tilápia pela exposição a misturas de herbicidas da cultura canavieira; BFT (SEG 03.13.09.007.00.00) - Avaliação da produção de juvenis de tilápia-do-nylo em sistema de bioflocos; Furnas (SEG 02.13.00.004.00.00) - Desenvolvimento de sistema de monitoramento para gestão ambiental da aquicultura: Suporte para a consolidação de indicadores para o plano de monitoramento e gestão ambiental da aquicultura; GMP (SEG 03.13.00.018.00.00) - Glúten de milho na alimentação de pacu: Coloração e qualidade da carne, desempenho e hematologia; Aquigov (SEG 05.14.15.001.00.00) - Desenvolvimento e aplicação de estratégias para gestão do portfólio de aquicultura; Aquaferti (SEG 03.14.00.080.00.00) - Avaliação de sistemas de produção integrada: Aquicultura e agricultura; BRS-Aqua (SEG 01.17.02.001.00.00); convertido para (SEG 21.17.02.001.00.00) - Fortalecimento da política de desenvolvimento produtivo da aquicultura no Brasil; Gestão do Portfólio da Aquicultura (Resolução Diretoria Executiva da Embrapa de 2019); FF\_BFT (SEG 30.20.00.034.00.00) - Determinação da frequência de alimentação para juvenis de tilápia-do-nylo em sistema bioflocos ; Artemisia (SEG 30.21.90.051.00.00) - Suplementação dietética com extrato alcoólico da planta *Artemisia annua* para melhoria da saúde, da resistência a doenças e aumento do crescimento de juvenis de tilápia-do-nylo; BFTEI (SEG 30.21.00.027.00.00) - Desenvolvimento e difusão de tecnologias para produção na fase inicial de peixes em sistemas bioflocos, entre outros.

Entre os resultados oferecidos pela Embrapa Meio Ambiente destacam-se o desenvolvimento e validação de metodologias e protocolos de pesquisa para análises de água e sedimentos, substâncias antimicrobianas, hormônios, metais pesados, desenvolvimento de métodos para avaliação de multirésíduos de agrotóxicos e outros contaminantes por meio de método de preparo de amostra QuEChERS, seguido de cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas (LC-MS/MS), ou cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS/MS) e gases de efeito estufa. Também foram disponibilizados indicadores de sustentabilidade e de impacto ambiental, bioindicadores de qualidade de água, microbiologia ambiental, e uso de biomarcadores, métodos para análise do desempenho de cadeias de suprimentos da aquicultura e testes ecotoxicológicos.

De igual modo, tecnologias de apoio à BPM e gestão ambiental da tilapicultura, disponibilizando informações e indicando recomendações técnicas à diferentes públicos foram desenvolvidas. Ainda, foram oportunizadas boas práticas de manejo (BPM) para assegurar a qualidade do pescado e a segurança ambiental da aquicultura, bem como, sistemas para redução da carga orgânica e poluentes dos efluentes da

aquicultura, melhoria da qualidade do pescado, métodos de despesca e processamento, nutrição, alimentação e manejo alimentar de organismos aquáticos, sanidade e bem-estar animal, parasitofauna e biomarcadores em peixes para monitoramento da saúde animal e da qualidade da água, e instrumentos de gestão ambiental com base em sistemas integrados. Preocupação também em prover alternativas para ampliar a inclusão digital de piscicultores nacionais foram também abordadas, onde alternativa para suprir essa carência nacional foi avaliada e apresentada.

Os recursos dos projetos citados também permitiram adequar e modernizar os laboratórios da Embrapa Meio Ambiente para melhor atender à realização dos estudos supracitados e de novas demandas de piscicultores nacionais. A expertise temática adquirida pela equipe técnica também contribuiu para as estratégias da Embrapa para o tema aquicultura, incluindo a participação no Portfólio Aquicultura, como também no apoio à implantação em 2009 da nova Unidade da empresa em Palmas, TO; que tem por missão aquicultura. Novas linhas de pesquisa nesse tema também continuam sendo iniciadas pela Embrapa Meio Ambiente, com ênfase no uso de biomarcadores fisiológicos para monitoramento ambiental da aquicultura, aditivos zootécnicos, desenvolvimento de novos testes ecotoxicológicos e avaliações de risco ambiental, novos recursos computacionais abordando outros sistemas de produção e espécies para o produtor, entre outros

Este capítulo tem por objetivo apresentar os principais resultados obtidos e disponibilizados pela Embrapa Meio Ambiente para a sociedade brasileira com foco no fortalecimento da aquicultura nacional.

## SISTEMAS DE PRODUÇÃO AQUÍCOLA E BOAS PRÁTICAS DE MANEJO PRODUTIVO E SANITÁRIO

O atual desafio para o desenvolvimento da aquicultura responsável está baseado em sistemas de produção eficientes, que otimizem a utilização de água e nutrientes, promovendo o menor impacto ambiental possível (Diana et al., 2013). O sistema bioflocos (BFT) atende esta premissa, pois permite a produção de peixes e camarões sem renovação ou com mínima troca de água, mantendo sua qualidade por meio do equilíbrio de bactérias heterotróficas, que convertem amônia em biomassa microbiana por meio da adição de uma fonte suplementar de carbono e aeração contínua, e sua composição nutricional pode ser utilizada como alimento complementar para peixes e camarões (Avnimelech, 2012; Crab et al., 2012).

Considerando a relevância do sistema bioflocos (BFT) para o desenvolvimento da aquicultura sustentável Hisano et al. (2021b), avaliariam o efeito da frequência de alimentação na qualidade da água, desempenho zootécnico, eficiência alimentar e

parâmetros hematológicos para tilápia-do-nylo em sistema BFT, e concluíram que a frequência de alimentação de quatro vezes ao dia promove as melhores respostas de crescimento e eficiência alimentar para tilápia-do-nylo ( $\geq 15$  g).

Em função do aproveitamento do biofloco como alimento proteico complementar, Hisano et al. (2019b) avaliaram o desempenho zootécnico, parâmetros hematológicos e a qualidade de água do sistema BFT para tilápia-do-nylo alimentadas com dietas contendo 28, 32 e 36% de proteína bruta (PB) e concluíram que os diferentes níveis proteicos avaliados não influenciam sobre o desempenho e saúde de juvenis de tilápia-do-nylo (6–25 g) em BFT, sendo possível uma redução de 8% na proteína dietética (28% PB) com potencial redução dos custos de produção e diminuição do impacto ambiental pelo excesso de proteína dietética

Em estudo comparativo com o sistema bioflocos (BFT) e o sistema de recirculação de água (SRA), Hisano et al. (2021a) verificaram que o ganho de peso, a taxa de conversão alimentar aparente e a eficiência da proteína dos peixes em BFT foram estatisticamente superiores em comparação com o SRA, reforçando a importância do biofloco como alimento complementar de alto valor biológico. (Hisano et al., 2019a) demonstraram que o policultivo (tilápia e camarão) no sistema BFT proporcionou ganho em peso para tilápia superior em 50,95%, quando comparado aos animais produzidos no SRA, demonstrando o benefício da integração da produção de duas espécies de importância na aquicultura mundial

Com relação ao uso racional e armazenamento de água, existem tecnologias para integração de dois processos para utilização da água do escoamento superficial. Um deles trata do armazenamento da água em tanques elevados e lonados, biofiltração e produção de peixes para integração com produção animal e vegetal. O outro processo é a captação da água e barramento em sistemas “barraginhas”, construídas para aumentar a infiltração da água no solo, formando frentes de armazenamento subterrâneo de água que possibilita a construção de cacimbas de estoque de água com boa qualidade. Nesse sistema, a água armazenada (captação de chuva) é filtrada com brita e plantas macrófitas para melhoria de sua qualidade, possibilitando que seja utilizada na produção de peixes. Uma fração da água dos tanques de peixes é disponibilizada para a irrigação de culturas que tenham baixa necessidade hídrica, atuando como carreador de nutrientes produzidos pelos peixes para fertilização das plantas. A outra fração é novamente submetida ao processo de filtração e retorna aos viveiros e tanques de piscicultura como forma de reposição de água utilizada na irrigação e da água perdida por evaporação (Hermes, 2007).

Silva et al. (2013) orientam sobre a gestão sustentável da água utilizada nas atividades aquícolas, bem como, dos resíduos gerados e apresentam métodos de tratamento da água usada na produção, notadamente os naturais, como os biofiltros e aplicação de efluentes no solo (fertirrigação). Queiroz et al. (2017) apresentam um conjunto de

BPM para a aquaponia (sistema integrado de produção de peixes com hidroponia) e destacam as vantagens dessa atividade para o uso mais eficiente da água.

Embora existam várias tecnólogas disponíveis para o uso múltiplo e sustentável da água para a criação de peixes, em geral, nos sistemas de produção tradicionais existe um aporte significativo de nutrientes e matéria orgânica da ração, que muitas vezes prejudica a qualidade da água com excesso de fitoplâncton, baixa concentração de oxigênio dissolvido e alta concentração de amônia e, também em condições insatisfatórias dos sedimentos do fundo dos viveiros e reservatórios (Queiroz et al., 2004a, 2007b).

A formulação de dietas nutricionalmente completas, favoráveis ao meio ambiente e viáveis economicamente é fundamental (Cyrino et al., 2010). Para que as rações sejam formuladas com as características citadas é de extrema importância o uso de ingredientes de alta qualidade. Tradicionalmente, para formulação de rações, há grande dependência de ingredientes convencionais, tais como milho, farelo de soja, farinha de peixe, etc. No entanto, para minimizar essa dependência, é importante a identificação, avaliação e uso de ingredientes alternativos, com o objetivo de minimizar os riscos associados à disponibilidade e oscilação de preço dessas matérias-primas, além de disponibilizar ao formulador, um leque de opções adicionais (Glencross, 2016; Sanchez et al., 2016).

Dada a importância do conhecimento de informações acerca da qualidade de um alimento, estudos foram conduzidos pela equipe da Embrapa Meio Ambiente com o objetivo de avaliar a qualidade de alguns ingredientes alternativos, assim como, o impacto da inclusão desses ingredientes na alimentação de diferentes espécies de peixes.

O pinhão-mansô é uma planta oleaginosa arbustiva com potencial para produção de biodiesel. Os coprodutos oriundos da extração de seu óleo (torta e farelos) podem, com certas limitações, ser utilizados como fonte proteica para alimentação animal (Della Flora et al., 2014). Hisano et al. (2015a) avaliaram os coeficientes de digestibilidade aparente (CDA) de nutrientes, energia e aminoácidos de torta de pinhão-mansô atóxica e detoxificada para tilápia-do-nylo e verificaram que o CDA dos aminoácidos de ambos os alimentos foi superior a 80%, exceto para a glicina, para a torta de pinhão-mansô atóxica, e para treonina para a detoxificada, podendo concluir que o CDA das tortas apresentam potencial para inclusão em dietas de tilápia-do-nylo.

O milho é considerado um dos principais ingredientes energéticos para a alimentação de diferentes espécies animais, incluindo peixes. Sanchez et al. (2016) concluíram que o sorgo pode substituir integralmente o milho em dietas para juvenis de pacu, uma vez que os CDA da proteína e energia foram de 94,3% e 77,2%, respectivamente, e não foram observadas diferenças entre as dietas quanto aos parâmetros de desempenho avaliados. Com o objetivo de avaliar a substituição da proteína do farelo

de soja (FS) pela do farelo de glúten de milho (FGM) na alimentação de juvenis de pacu, Hisano et al. (2016) verificaram que a substituição de até 38,7% da proteína do FS pela do FGM (aproximadamente, 9,5% de inclusão de FGM na dieta) melhorou o desempenho, o rendimento de carcaça, sem afetar negativamente os parâmetros sanguíneos e a qualidade do filé.

Na busca por substitutos aos ingredientes proteicos convencionais, os coprodutos oriundos do beneficiamento do pescado, surgem como alternativa com alto potencial de uso em dietas para organismos aquáticos. Hisano e Borghesi (2015) verificaram redução na contagem total de mesófilos aeróbios totais, aeróbios psicotróficos, *Pseudomonas spp.* e *Staphylococcus spp.* e as análises químicas demonstraram níveis em proteína acima de 24% e alto teor de lipídio (acima de 52%), que pode limitar a aplicação em rações para peixes. Os autores recomendam o uso da proporção de 0,75 de ácido fórmico e 1,0 de ácido cítrico para o preparo de silagens de vísceras de surubim para adequada preservação, qualidade nutricional e microbiológica, além de menor custo.

Gonçalves et al. (2013a) concluíram que a silagem ácida de pescado pode ser utilizada como fonte proteica alternativa na alimentação de juvenis de pacu sem influenciar negativamente os parâmetros hematológicos avaliados. Santana et al. (2013) verificaram que a silagem ácida co-seca não promove alterações deletérias nos parâmetros hematológicos dos juvenis de pacu e, portanto, pode ser utilizada como fonte proteica alternativa.

O uso de coprodutos do beneficiamento de alimentos de origem animal, o hidrolisado proteico (HP) vem ganhando importância como ingrediente em dietas organismos aquáticos. No estudo de Gomes (2020), com alevinos de *O. niloticus*, peso inicial de  $1,38 \pm 0,13$  g e  $1,70 \pm 0,10$  g, não foi observado efeito significativo do hidrolisado proteico (HP), para as variáveis de desempenho produtivo, índices corporais e variáveis metabólicas. Mesmo o hidrolisado não apresentando efeito palatilizante e promotor de crescimento, em condições de desafio, o nível de inclusão de 4% protegeu contra danos oxidativos.

Carra et al. (2013) avaliaram os parâmetros hematológicos e estresse oxidativo medindo o eritrograma, leucograma, peroxidação lipídica hepática e atividade da catalase e glutatona S-transferase de juvenis de pacu alimentados com dietas contendo diferentes óleos e combinação dos mesmos (óleo de girassol, óleo de canola, óleo de linhaça e óleo de peixe e uma mistura de óleo de linhaça + óleo de peixe e óleo de linhaça + óleo de canola). Os autores verificaram que todas as fontes de lipídios avaliadas podem ser utilizadas como ingredientes na ração de juvenis de pacu por um período de 60 dias, sem afetar negativamente seu estado de saúde.

A qualidade das rações tem papel fundamental na produtividade e na manutenção da qualidade da água dos sistemas de produção aquícola. Portanto, a adoção de BPM com foco no manejo alimentar adequado à espécie criada e ao tipo de sistema produtivo poderá contribuir diretamente para prevenir e reduzir qualquer impacto

negativo e, conseqüentemente, irá assegurar a melhoria dos índices produtivos e ambientais. Em grande medida as BPM têm como finalidade indicar maneiras simples e eficazes para melhorar o manejo da produção de modo a aumentar a produtividade e, ao mesmo tempo, prevenir impactos ambientais negativos resultantes da descarga de efluentes que contenham concentrações elevadas de matéria orgânica, sólidos totais suspensos e outros poluentes. Portanto, é importante realizar o manejo correto dos viveiros e dos tanques de piscicultura, usar rações com alta digestibilidade, monitorar a qualidade da água, tratar os efluentes e adotar boas práticas de manejo (BPM).

A produção de organismos aquáticos pode resultar na geração de resíduos provenientes das sobras de ração não consumida e de metabólitos, o que tem exigido o aprimoramento das práticas de manejo. As perspectivas para a expansão da produção de pescados no Brasil são muito animadoras devido ao potencial existente no país, no entanto, é preciso combinar a expansão dessa atividade com a exploração adequada dos recursos naturais e a adoção de boas práticas de manejo (BPM) (Queiroz, 2016; Boyd et al., 2020; Valenti et al., 2021).

A primeira versão de BPM para a produção em escala comercial de peixes intitulada *Best Management Practices for Channel Catfish Farming in Alabama - Special Report No. 1*, foi realizada a partir de um amplo estudo realizado por Boyd et al. (2000a, 2000b) e publicada em março de 2003 (Boyd et al., 2003). São 15 categorias diferentes de BPM para melhorar o desempenho ambiental e a competitividade econômica da produção de *catfish*.

Desde 2003 essas BPM têm sido utilizadas como meio de monitorar e gerenciar a produção de peixes nos Estados Unidos, como também, foram adaptadas para outras espécies produzidas em outros países (Boyd et al., 2008). A adoção de BPM tem sido, então, amplamente preferida como forma de antecipar-se a regulamentações ambientais restritivas, as quais, em geral, são baseadas em variáveis de qualidade de água e dos efluentes dos viveiros de produção aquícola. Simultaneamente a essas ações um grande esforço, em escala global, tem sido dedicado ao desenvolvimento de um *Eco-Label* para programas de certificação da aquicultura. Esses programas se baseiam em padrões para os quais cada um dos participantes deve demonstrar observância, sendo que a maneira mais prática e usual de alcançar esses padrões é pela adoção de BPM (Boyd et al., 2008, 2013).

Muitas BPM indicadas neste capítulo são resultantes de projetos de pesquisa conduzidos pela Embrapa Meio Ambiente em parceria com outras Unidades Descentralizadas da Embrapa, assim como, com outras instituições de fomento, ensino e pesquisa no Brasil e no exterior. Diferentes métodos de produção foram avaliados na busca de um manejo mais eficiente para otimizar os índices zootécnicos de produção, e também para aumentar a eficiência de cada um desses sistemas. A identificação das demandas e prioridades de PD&I da cadeia produtiva da aquicultura foi fundamental

para atingir esses objetivos. Diversos workshops e reuniões técnicas foram realizados para discutir a importância da adoção e validação de BPM para a aquicultura, e consideraram desde a escolha do sistema de produção mais adequado até as diferentes realidades regionais (Queiroz et al., 2002, 2005a, 2007a).

Entre os principais tópicos das BPM constam a retenção e tratamento de efluentes de viveiros de piscicultura e de criação de camarões, avaliação de métodos de calagem, remoção da matéria orgânica de viveiros de piscicultura, redução do acúmulo de amônia, determinação do percentual de troca de água e manutenção de concentrações adequadas de oxigênio dissolvido em viveiros de piscicultura, tanques-rede e lagos de pesca (Kitamura et al., 1999, 2002; Boyd; Queiroz, 2001a; Queiroz; Kitamura, 2001; Boyd et al., 2002, 2003; Rotta; Queiroz, 2003; Queiroz; Silveira, 2006; Queiroz; Boeira, 2006a, 2007, 2008, 2016; Lopes et al., 2011; Kimpara et al., 2013; Queiroz et al., 2016). Ademais, vários indicadores físicos, químicos e biológicos de qualidade da água e de sedimentos foram padronizados, bem como, recomendações práticas para otimizar o manejo produtivo de diversos sistemas de produção aquícola foram feitas com base na análise emergética (Queiroz et al., 2000; Cavalett et al., 2006, 2007).

Simultaneamente, a esses trabalhos, entre 2007 e 2014 foram desenvolvidas várias pesquisas em parceria entre a Embrapa Meio Ambiente e a APTA Polo Regional Leste Paulista, localizado em Monte Alegre do Sul. Os objetivos principais foram avaliar os efeitos da densidade de estocagem, frequência alimentar, diferentes linhagens de tilápia e percentual de proteína bruta na qualidade da água, no desempenho zootécnico dos peixes, e avaliação econômica. Aspectos relevantes referentes ao regime climático da região, características da represa, manejo da produção, qualidade da água, desempenho zootécnico e os índices econômicos foram considerados para cada um dos experimentos (Turco et al., 2013; Frasca-Scorvo et al., 2019). Coeficientes técnicos sobre a produção de tilápias em tanques-rede em represa rural também foram gerados (Frasca-Scorvo et al., 2012).

Os resultados obtidos permitiram concluir que o melhor desempenho zootécnico e econômico para produção de tilápia em tanques-rede instalados em pequenos reservatórios rurais na região de Monte Alegre do Sul poderão ser alcançados a partir do uso de densidades de estocagem entre 100 e 150 peixes/m<sup>3</sup> para as linhagens GIFT e Supreme, associadas à oferta de ração duas vezes ao dia e durante os sete dias da semana, alimentadas com ração comercial contendo 32% de PB (Frasca-Scorvo et al., 2017a, 2017b, 2018).

Como recomendações aos produtores da região e locais com características similares, as seguintes BPM podem ser consideradas como práticas gerais para a produção de tilápia em tanques-rede em reservatórios rurais: monitorar diariamente a temperatura da água (°C), oxigênio dissolvido (mg L<sup>-1</sup>), pH (unidades de pH) e transparência

(cm) com disco de Secchi e registrar, diariamente, em local próximo aos tanques-rede a temperatura máxima e mínima (°C) do ar (Queiroz; Silveira, 2006); secar os reservatórios, na medida do possível, entre os diferentes ciclos de cultivo e coletar amostras dos sedimentos do fundo para determinar a necessidade de calagem (Boyd; Queiroz, 2004, 2014; Queiroz et al., 2004a, 2004b, 2004c, 2004d, 2006a; Queiroz; Boeira, 2006a, 2006b); utilizar linhagens com melhoramento genético adaptadas às características climáticas da região (Frasca-Scorvo, 2017b); considerar que a duração do ciclo de produção é maior em regiões de clima mais frio, ao contrário de outras regiões onde a temperatura da água fica mais próxima da faixa de conforto dos peixes (Queiroz et al., 2021a); e observar o comportamento dos peixes e o consumo de ração nos dias com temperaturas da água abaixo de 20 °C. Se houver sobras, reduzir ou até mesmo suspender a oferta de ração aos peixes (Queiroz et al., 2021b); realizar pelo menos a cada 15 dias biometrias para ajustar a quantidade de ração oferecida aos peixes (Ishikawa et al., 2020). A oferta diária de ração deve aumentar à medida que os peixes crescem, e a quantidade deve ser ajustada em intervalos de 7 a 14 dias (Frasca-Scorvo et al., 2011); avaliar o desempenho zootécnico com base nos seguintes indicadores: a) ganho de peso total; b) ganho de peso dia<sup>-1</sup>; c) biomassa final; d) conversão alimentar aparente; e) taxa de sobrevivência; observar se há sintomas de estresse ou de doenças nos peixes, especialmente, nos períodos de mudanças bruscas de temperatura e, caso possível, encaminhar peixes doentes para um laboratório especializado em diagnóstico de doenças (Ishikawa et al., 2020); avaliar a saúde e a presença de ectoparasitos de três a cinco peixes de cada tanque-rede durante a biometria (Ishikawa et al., 2016). Caso seja observada uma redução no desempenho dos peixes, recomenda-se eutanasiar um peixe de cada um dos tanques-rede, por aprofundamento anestésico, utilizando-se óleo de cravo na concentração de 250 mg L<sup>-1</sup> para avaliação dos órgãos internos e pesquisa de ecto e endoparasitos (Vidal et al., 2008); monitorar diariamente com disco de Secchi a transparência (cm) da água dos reservatórios com grande quantidade de tanques-rede que deve ser mantida entre 50 e 100 cm (Rotta; Queiroz, 2003; Rotta et al., 2010a, 2010b; Queiroz; Rotta, 2016); evitar trocar a água dos reservatórios após períodos de chuvas fortes para impedir a entrada de grande quantidade de sólidos em suspensão e aumento da turbidez, (Frasca-Scorvo et al., 2011); anotar todos os gastos com a criação para determinar o custo de produção (Turco et al., 2013); efetuar uma avaliação econômica considerando-se um ciclo completo de produção com peso final comercial, com base no custo operacional de produção que compõe o custo operacional efetivo (COE) e o custo operacional total (COT) (Turco et al., 2014).

Ishikawa et al. (2020) apontam uma série de BPM para manejo sanitário da piscicultura com a inclusão do uso de biomarcadores em peixes, e também apresentam um resumo dos principais pontos críticos sanitários com relação a localização e impactos de poluentes; segurança dos alimentos; transporte e quarentena

de alevinos; preparação e desinfecção das unidades de produção; prevenção de tratamento de infecções causadas por patógenos; descarte de peixes mortos e qualidade do produto final.

## SAÚDE, BEM-ESTAR ANIMAL E PADRONIZAÇÃO DE TESTES ECOTOXICOLÓGICOS, DE PESTICIDAS E ANTIMICROBIANOS UTILIZADOS NA AQUICULTURA

A produtividade da aquicultura está fortemente relacionada com a sanidade dos organismos aquáticos e da qualidade ambiental. Procedimentos adequados e ferramentas eficazes precisam ser incluídos na rotina de produção de peixes e outros organismos aquáticos, para que os resultados econômicos, sociais e ambientais sejam positivos.

O uso de produtos químicos é muito comum na aquicultura, os quais são utilizados como combustíveis, fertilizantes, corretivos da acidez do sedimento do fundo dos viveiros, oxidantes, coagulantes, osmorreguladores, algicidas, herbicidas, controladores de predadores, anti-incrustantes, terapêuticos, desinfetantes, anestésicos, pesticidas e hormônios. Muitos desses produtos são perigosos e poucos produtos químicos foram desenvolvidos especificamente para uso na aquicultura. O seu uso deve ser feito somente quando necessário, ou quando alternativas não estiverem disponíveis (Hashimoto et al., 2011, 2012; Ishikawa et al., 2020).

O uso de hormônios pode gerar graves consequências na saúde animal e ambiental. A reversão sexual induzida por hormônios é muito praticada e é possível para muitas espécies com o uso de vários hormônios. O hormônio mais comum utilizado é o 17-metiltestosterona (MT) principalmente para a tilápia, entretanto, o seu uso tem sido controverso (Homklin et al., 2011; Rivero-Wendt et al., 2013). Esse hormônio é administrado na ração de tilápias na proporção de 30 a 60 mg/kg de ração. Bittencourt et al. (2011a, 2011b) e Rodrigues et al. (2014) avaliaram enzimas de biotransformação em tilápias expostas ao hormônio natural 17 $\beta$  estradiol. Esses compostos são farmacologicamente ativos e entram no ambiente, principalmente, nas águas superficiais. Biomarcadores hematológicos podem ser utilizados para monitorar a toxicidade dos hormônios no sangue de peixes expostos a estes poluentes por meio de testes de genotoxicidade, assim como, na toxicidade decorrentes da exposição aos pesticidas (Hooftman; Raat, 1982; Rivero et al., 2008; Grisolia et al., 2009).

A integração do uso de biomarcadores para o monitoramento da saúde dos peixes e da qualidade da água, associado à adoção de Boas Práticas de Manejo Sanitário (BPMS) contribuem diretamente para a promoção do bem-estar e saúde dos peixes e, consequentemente, para a qualidade do pescado (Ishikawa et al., 2020). Biomar-

cadadores são sinalizadores das respostas biológicas que ocorrem em um organismo após sua exposição a um agente poluente (Schlenk, 1999). Os biomarcadores têm sido muito utilizados para avaliar a saúde dos peixes, e também são muito úteis e precisos para avaliar a qualidade ambiental, especialmente na detecção preventiva de efeitos adversos (Amorim, 2003; Jesus; Carvalho, 2008; Lins et al., 2010; Cardoso et al., 2020; Ferri et al., 2020).

O uso de biomarcadores hematológicos, comportamentais, patológicos e de estresse em peixes se destaca como uma ferramenta prática que pode ser aplicada em uma piscicultura sem comprometer a rotina de produção. Todavia, necessita de padronização e treinamento dos funcionários para ser viável. Por exemplo, o monitoramento da parasitofauna dos peixes é uma ferramenta que pode ser utilizada durante a biometria, ou mesmo na hora da despesca. Esse procedimento, além de fornecer informações sobre o estado de saúde dos peixes, também pode auxiliar o piscicultor no manejo dos viveiros, tanques-rede e no monitoramento da qualidade da água (Madi; Ueta, 2009, 2012; Bianchi et al., 2014; Ishikawa et al., 2016; Brum et al., 2019).

Nos últimos anos tem-se observado um aumento crescente no uso de metodologias para monitoramento e avaliação do estado de saúde dos peixes, prevenção, redução de doenças e indicação de BPM para manejo sanitário a partir do uso de biomarcadores sanguíneos, histopatologia e na avaliação da parasitofauna (Tavares-Dias et al., 2009; Jerônimo et al., 2014a, 2014b, 2015, 2016, 2020; Pádua et al., 2014a, 2014b, 2015, 2016; Dal'Bó et al., 2015; Fujimoto et al., 2015a, 2015b, 2019; Pereira et al., 2016; Sampaio et al., 2016; Ventura et al., 2016, 2018a, 2018b; Ishikawa et al., 2017a, 2017b).

Neste contexto, estudos “in vitro” com bioindicadores enzimáticos são realizados pela adição do poluente num sistema de reação contendo o substrato juntamente com a enzima, extraída de uma célula ou tecido do organismo aquático, supostamente não exposto à ação do contaminante. Portanto, estudos de avaliação da atividade enzimática “in vitro” representam uma ferramenta útil na triagem de vários agentes poluentes, e têm sido usados em áreas de monitoramento como métodos de análise semi quantitativa de poluentes orgânicos e metais pesados (Jonsson; Aoyama, 2007, 2010).

Os estudos “in vivo” são realizados através da medida da atividade do bioindicador enzimático, o qual é extraído do organismo aquático submetido ao agente tóxico sob um dado período de tempo. Estes estudos são realizados pela exposição do organismo a concentrações do poluente, em condições laboratoriais ou de campo. Os dados dose-resposta que são gerados, auxiliam no estabelecimento de níveis aceitáveis de concentração no compartimento aquático e na avaliação de áreas impactadas e seu monitoramento (Jonsson; Aoyama, 2010). Por exemplo, a aplicação de diflubenzuron para controlar ectoparasitas, como a *Lernaea ciprinacea* e *Dolops carvalhoi* é uma prática que vem sendo empregada na piscicultura, embora o composto químico não

seja indicado para esse fim segundo a legislação. Estudos recentes demonstraram que diferentes concentrações do inseticida diflubenzuron de seu metabolito (p-cloroanilina) e de suas misturas, induziram a atividade da enzima catalase independentemente da presença ou ausência de sedimento. Além disso, foram observados aumentos nas atividades das enzimas fosfatases e transaminases (Dantzger et al., 2018).

Em outros estudos Dantzger et al. (2017) investigaram os efeitos inibitórios “in vitro” de quatro pesticidas e três metais sobre as fosfatases ácidas extraídas do microcrustáceo de água doce *Daphnia similis* e do fígado do peixe *Metynnis argenteus*. Os resultados demonstraram que apenas os metais têm consideráveis efeitos inibitórios (50% ou mais) sobre a atividade enzimática. Os dados sobre atividades enzimáticas obtidas na presença desses inibidores são de potencial uso como bioindicadores “in vivo” para metais em ambas as espécies aquáticas citadas.

Em organismos aquáticos, distúrbios por compostos químicos no ambiente podem levar a perturbação e reação bioquímica. Se estas alterações forem observadas com uma certa antecedência, pode ser possível a identificação de problemas ambientais antes que o ecossistema aquático como um todo seja afetado. Em função destas características, os bioindicadores ao nível bioquímico são apontados como sistemas de “sinal de alerta” na avaliação da saúde ambiental (Jonsson; Aoyama, 2010). Cardoso et al. (2020) e Ferri et al. (2020) avaliaram as respostas fisiológicas e bioquímicas em tilápias e tuviras submetidas a concentrações subletais e agudas de triclorfon fornecendo informações para auxiliar no diagnóstico e monitoramento ambiental.

As enzimas antioxidantes de defesa mostraram-se bons indicadores de exposição e da mensuração da toxicidade dos contaminantes. Outros parâmetros, como alteração morfológica das brânquias e fígado e de parâmetros hematológicos indicadores de toxicoses em peixes, podem ser associados às análises bioquímicas como parâmetros de resposta individual à exposição.

Biomarcadores de estresse oxidativo foram monitorados em peixes (*Piaractus mesopotamicus*) expostos a nano-TiO<sub>2</sub>. Foram verificadas as concentrações de hidropéroxido lipídico (LPO), proteínas carboniladas (PCO) e atividades específicas de superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e glutathione S-transferase (GST). Outros biomarcadores, bem como atividades específicas de fosfatase ácida (AP), Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> - ATPase e níveis de metalotioneína (MT) também foram avaliados. Ensaio de micronúcleo e cometa foram realizados para avaliar a genotoxicidade. Apesar dos resultados mostrarem baixa toxicidade do nano-TiO<sub>2</sub> para peixes e falta de acúmulo de titânio no tecido muscular, foi observada a ocorrência de efeitos nos marcadores enzimáticos que foram influenciados pela fase do cristal do nano-TiO<sub>2</sub> e pela condição de iluminação. Esses resultados demonstram que a atividade específica de CAT, GST, níveis de PCO e ensaio do cometa são úteis como biomarcadores de exposição prolongada (Clemente et al., 2015).

Concentrações de hormônios, substâncias antimicrobianas, metais pesados e pesticidas utilizados nos diversos sistemas de produção aquícola, ou introduzidas pelas atividades externas, assim como, a determinação do DNA de bactérias indicadoras de poluição, e também de bactérias resistentes isoladas de manguezais próximos das fazendas de produção de camarões também foram determinados com sucesso, tais como: determinação de enzimas do metabolismo oxidativo, intermediário e hepático (Jonsson et al., 2002, 2017; Sampaio et al., 2016; Dantzger et al., 2018); implementação de métodos de análises e determinação da concentração de substâncias antimicrobianas nos peixes cultivados em sistemas integrados à piscicultura/suinocultura (Nunes et al., 2018a, 2018b; Shiroma et al., 2020, 2021); desenvolvimento de método multirresíduo para análise de pesticidas organoclorados utilizando o QuEChERS para preparo das amostras (Hashimoto et al., 2012; Ferracini et al., 2014; Nunes et al., 2018a; Shiroma et al., 2020).

A utilização do zebrafish (*Danio rerio*), como modelo de comportamento e de desenvolvimento motor, tem se mostrado muito promissor nos estudos desenvolvidos pela equipe da Embrapa Meio Ambiente para avaliação da toxicidade de compostos usados para melhorar a qualidade nutricional da dieta dos peixes. O comportamento locomotor em organismos é importante para evitar predadores, buscar alimentos, reprodução e, portanto, é um parâmetro de relevância ecológica. O ácido ascórbico (AA) é necessário na alimentação diária e é essencial na reprodução, crescimento e mecanismos imunológicos mas, tem que ser adicionado na dieta. Porém, ele é instável na sua forma pura devido à influência da luz, altas temperaturas e oxigênio. Neste contexto, a nanoencapsulação pode proteger e preservar as características e propriedades físico-químicas do AA por um período de tempo prolongado devido a diminuição de perdas por estes fatores ambientais. Luis et al. (2021) demonstraram que o uso de AA nanoencapsulado aumentou a distância percorrida e a velocidade dos organismos em estudos experimentais.

## USO DE ADITIVOS ZOOTÉCNICOS E BIORREMEIADORES PARA MELHORIA DO DESEMPENHO ANIMAL, QUALIDADE DA ÁGUA E PREVENÇÃO DE ENFERMIDADES EM PEIXES

Os aditivos destinados à alimentação animal podem ser definidos como substância, microrganismo ou produto formulado, adicionados intencionalmente e que não são utilizados normalmente como ingredientes, podendo apresentar valor nutritivo, ou não, e que melhore as características dos produtos destinados à alimentação animal, com respostas sobre o desempenho dos animais sadios ou que atenda suas necessidades nutricionais (Brasil, 2004). O uso de aditivos zootécnicos, e também de

biorremediadores veem atender algumas metas de inovação da Embrapa Meio Ambiente com relação a adoção, pela indústria de insumos para alimentação e saúde animal, de rações e/ou aditivos "*eco-friendly*" que resultem em sistemas de produção saudáveis e de menor impacto ambiental, e também da adoção, pela cadeia produtiva de produtos de origem vegetal ou animal, e de processos agropecuários para aumentar eficiência no uso de insumos e de recursos naturais, diminuir impacto socioambiental e garantir segurança do alimento.

Portanto, devido à necessidade de manter a qualidade da água dos sistemas de produção, assegurar um bom desempenho zootécnico e contribuir para a saúde e o bem-estar dos organismos aquáticos o uso de biotecnologia vem crescendo em todo mundo. Queiroz et al. (1998) e Queiroz e Boyd (1998) avaliaram os efeitos do uso de enzimas e bactérias na produção de *catfish* e observaram efeitos positivos na qualidade da água dos viveiros e no desempenho zootécnico dos peixes. Atualmente, tem crescido o uso de probióticos na aquicultura para aumentar os índices de produtividade e promoção de melhorias na qualidade da água e redução da incidência de doenças nos peixes e a equipe da Embrapa Meio Ambiente vem realizando vários projetos nessa área.

É importante destacar que o probiótico ideal é aquele que não é patogênico ao hospedeiro, além de ser espécie-específico e ter capacidade de ultrapassar o ambiente ácido do suco gástrico e chegar ao intestino, onde o hospedeiro receberá os efeitos positivos do probiótico. As bactérias ácido lácticas são as mais utilizadas como microrganismos probióticos, com destaque para as dos gêneros *Lactobacillus* e *Bifidobacterium*, além de espécies dos gêneros *Bacillus* e *Escherichia* e fungos *Saccharomyces cerevisiae* (Vieira; Pereira, 2016).

Os probióticos são definidos como células vivas ou um substrato que fornece benefícios por meio da estimulação do crescimento, melhora a digestão, melhora a resposta imunológica e ingerida com o objetivo de promover uma boa saúde. Os probióticos também podem melhorar a qualidade da água e a gestão dos sistemas de produção aquícola em viveiros escavados e sistemas de recirculação de água (Reddy, 2015). Os microrganismos que estão nos viveiros escavados e nos reservatórios utilizados para criação de peixes estão em contato direto com estes animais, com suas brânquias e com o alimento fornecido possibilitando um acesso para o trato digestivo do animal. Microrganismos potencialmente patogênicos, oportunistas, causam infecções, pioram o desempenho zootécnico e podem causar até a morte. Por esta razão, a suplementação de probióticos para organismos aquáticos causa um efeito benéfico ao animal bem como ao meio ambiente de produção (Reddy, 2015).

Na Embrapa Meio Ambiente foram realizados trabalhos com patógenos de peixes como *Aeromonas hydrophila* e *Streptococcus agalactiae*, bactérias responsáveis pela incidência de doenças severas em peixes, que ocasionam perdas significativas na aqui-

cultura. Para tratar essas doenças, são utilizados antibióticos, os quais podem deixar resíduos nos alimentos e ocasionar resistência antimicrobiana. Desse modo, o controle de patógenos e a profilaxia de enfermidades deve ser realizado com a finalidade de minimizar os impactos negativos nos organismos aquáticos, nos seres humanos e no meio ambiente. Assim, tem se buscado alternativas mais saudáveis para substituir essas moléculas sintéticas e o uso de bactérias ácido lácticas (BALs) e/ou seus produtos de metabolismo é uma delas.

Bonin et al. (2019) avaliaram a atividade antagonista de bactérias ácidos lácticas bem como o produto do metabolismo destas, cultivada em dois diferentes meios de crescimento, leite em pó à 10% e meio “De Man Rogosa & Sharpe” (MRS) acrescido de leite (2%) em pó, contra patógenos de peixes, pelo uso do método de difusão em ágar. O melhor resultado de inibição foi observado para bactérias ácido lácticas inoculadas em leite em pó a 10%. Os resultados foram promissores e a aplicação de BALs e/ou seus metabólitos em rações destinadas ao consumo animal, ou em alimentos para humanos devem ser realizados a fim de identificar quais são as substâncias produzidas pelas BALs e a viabilidade de seu uso.

O desenvolvimento da aquicultura enfrenta desafios, incluindo doenças que podem causar perdas econômicas substanciais. Essas doenças podem ser controladas com o uso de produtos químicos como antibióticos. No entanto, o uso indiscriminado dessas substâncias pode ocasionar resultados negativos na saúde humana e no ambiente com o risco adicional de resistência a esses compostos. De modo a obter um sistema mais eficaz e menos prejudicial para o controle de doenças bacterianas em peixes, podem ser usados fitoterápicos em associação com nanotecnologia como nanopartículas de zeína associadas com eugenol e óleo essencial de alho. As formulações de nanopartículas contendo os óleos apresentaram menor toxicidade nos testes realizados com um biomarcador (*Artemia salina*). Os sistemas mostraram atividade bactericida contra as importantes bactérias patogênicas de peixes *Aeromonas hydrophila*, *Edwardsiella tarda*, e *Streptococcus iniae* in vitro (Luis et al., 2020).

A matéria orgânica da aquicultura pode desenvolver condições anóxicas em seus ambientes e afetar negativamente a ecologia dos organismos bentônicos. A biorremediação é um método de restauração ambiental aplicado globalmente com vistas a reduzir a poluição ambiental. Neste método, a poluição orgânica e inorgânica é destruída por microorganismos. Kara et al. (2021) investigaram o potencial de biorremediação de efluentes da aquicultura contendo matéria orgânica e metais, através do uso de isolados *B. thuringiensis*. Houve uma eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato correspondente a 4, 80 e 100%, respectivamente. Para os metais Ni, Cr, Se, Al, Cd, Mn, Fe, and B essa eficiência foi de 57%, 50%, 50%, 43%, 40%, 23%, 5%, e 2%, respectivamente. Tang et al. (2018) também relataram a eficiência do *Bacillus* no tratamento de nitrato de águas residuais na aquicultura.

Apesar de microrganismos usados como agentes biorremediadores (ou como biopesticidas) estarem amplamente distribuídos na natureza, a aplicação dos mesmos de uma maneira “não-natural” produz preocupação quanto à sua segurança ambiental. Neste sentido, se avaliou a susceptibilidade dos organismos-teste *Daphnia similis* (microcrustáceo) e *Biomphalaria glabrata* (molusco) frente aos possíveis efeitos adversos do *Bacillus thuringiensis israelensis* (Bti) (Oliveira Filho et al., 2011). Foi relatado que esta subespécie de *Bacillus* pode ser usada na biodegradação de resíduos de penas de aves para produção de biopesticidas (Poophathi et al., 2014). A maior concentração testada de Bti ( $1,5 \times 10^6$  esporos/mL) não promoveu imobilidade em *D. similis* para exposições de 48 horas. De modo análogo, em *B. glabrata*, verificou-se ausência de letalidade quando os organismos foram expostos a  $5 \times 10^6$  esporos/mL por um período de 30 dias (Oliveira Filho et al., 2011). Os resultados demonstraram a inocuidade de Bti para algumas espécies bioindicadores aquáticas relacionada ao potencial de uso deste microrganismo como agente biorremediador de efluentes da aquicultura.

A intensificação da produção animal resulta muitas vezes em condições estressantes que facilitam o surgimento de doenças. Para controlar essas enfermidades são utilizados medicamentos sintéticos como os antibióticos, porém esses produtos podem ser tóxicos para outros organismos aquáticos (não alvos) e deixar resíduos nos alimentos. Um problema grave no uso de antibióticos é a possibilidade de selecionar microrganismos patogênicos resistentes a esses medicamentos. Devido a isso, o seu uso é restrito ou proibido em alguns países. Assim, abordagens mais ecologicamente corretas para prevenir doenças vêm sendo buscadas pelos pesquisadores. Substâncias de origem vegetal (na forma de extratos, óleos essenciais ou moléculas isoladas) com potencial para prevenir e/ou controlar doenças de animais aquáticos são ótimas alternativas uma vez que são conhecidas por sua segurança, baixa toxicidade e impactos ambientais mínimos. A fitoterapia tem mostrado possuir um papel importante no aumento da função imunológica de animais aquáticos, atividades antivirais, antibacterianas e antiparasitárias (Zhu, 2020).

Recentemente, pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente vêm trabalhando na busca de substâncias bioativas de origem vegetal para tratamento sanitário de tilápia no âmbito do projeto BRS-Aqua. Para isso vários óleos essenciais, extratos de plantas e substâncias isoladas vêm sendo avaliadas contra bactérias causadoras de doenças em peixes. Como resultado, 31 óleos essenciais adquiridos comercialmente foram avaliados contra cepas de *Aeromonas hydrophila* (ATCC 7966) e de *Streptococcus agalactiae* (ATCC 13813). Para o bioensaio foi utilizado o método de disco difusão. Os resultados obtidos demonstraram alto potencial antimicrobiano de dois óleos essenciais para ambas as bactérias, o óleo de orégano (*Origanum vulgare*) e o de tomilho (*Thymus vulgaris*). Análises realizadas por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de

massas (GC-MS) detectaram a presença dos compostos majoritários sendo: carvacrol (69,1%) e p-cimeno (18,8%) no óleo de orégano e timol (45,5%) e p-cimeno (35,6%) no óleo essencial de tomilho (Souza et al., 2019). Esses óleos essenciais ou as moléculas bioativas isoladas possuem potencial para serem utilizadas no tratamento e prevenção de bacterioses em peixes.

Resultados promissores foram encontrados quando uma ração para peixes foi suplementada com extrato alcoólico da *Artemisia Annu* (ae-Aa; patente BR10201902707). Foi observada uma melhora no estado de saúde de juvenis de tilápia-do-nylo e um aumento na resistência a doenças quando os peixes foram desafiados com a bactéria *Aeromonas hydrophila*. Outros benefícios observados foram melhoria na conversão alimentar, maior crescimento, melhora no sistema imune e minimização da resposta ao estresse dos peixes de cultivo (Soares et al., 2020a, 2020b). Por meio de um contrato de inovação aberta entre a Embrapa e empresa privada parceira, a pesquisa será ampliada para testes de campo para certificação das respostas obtidas em escala de laboratório.

Na classe dos aditivos zootécnicos, destacam-se os ácidos orgânicos, que podem ser utilizados como substitutos de quimioterápicos promotores de crescimento na produção animal. Dentre alguns ácidos orgânicos, o ácido cítrico apresenta algumas vantagens, pois possuem sabor agradável, assimilação rápida, custo razoável, e resultados positivos no desempenho e na saúde intestinal de aves e suínos (Lückstädt, 2008). Por outro lado, poucos estudos foram realizados para atestar os efeitos benéficos do ácido cítrico na dieta sobre o desempenho, eficiência alimentar e disponibilidade de Ca e P em peixes, que foi o objetivo dos trabalhos coordenados pela equipe da Embrapa Meio Ambiente e parceiros.

Hisano et al. (2017a) avaliaram 0,0; 1,0; 2,0 e 3,0% de ácido cítrico em dietas isoproteicas (23% de proteína digestível) e isoenergéticas (13,38 MJ de energia digestível) para pacu concluíram que a suplementação de 2% de ácido cítrico da dieta melhora o desempenho dos peixes aos 30 dias, porém não foram observados efeitos significativos sobre a digestibilidade dos nutrientes e disponibilidade de P e Ca das dietas experimentais. Cardoso (2016) concluiu que a suplementação de 2% de ácido cítrico melhora a disponibilidade de cálcio e fósforo e influencia positivamente a morfologia intestinal de juvenis de tilápia-do-nylo.

Por outro lado, aditivos zootécnicos originados da levedura *Saccharomyces cerevisiae* e seus coprodutos, como levedura autolisada e parede celular de levedura (principalmente  $\beta$ -glucanos e mananoligossacarídeos-MOS) têm sido utilizadas em rações para peixes com respostas eficientes sobre desempenho e saúde (Hisano et al., 2007). Hisano et al. (2017b) concluíram que 0,2% de  $\beta$ -glucanos e MOS promovem melhores respostas de crescimento, eficiência alimentar e morfologia intestinal, sem efeitos prejudiciais sobre os parâmetros hematológicos para juvenis de pacu. Soares et al.

(2018) observaram que a suplementação de 0,1% de Glucan-MOS<sup>®</sup> melhorou o ganho de peso, a conversão alimentar e a taxa de eficiência proteica em comparação com a dieta controle e os níveis de 0,2 e 0,4% foram suficientes para incrementar a resposta imune e os desafios com estresse de manejo e bacteriano.

## INDICADORES INTEGRADOS PARA ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE E BPM AQUÍCOLA

Embora haja informações gerais sobre a importância das “novas” atividades para a economia rural brasileira, pouco se conhece quanto aos seus efeitos sobre o meio ambiente, bem como sobre as suas repercussões sociais e econômicas ao nível dos estabelecimentos e das localidades. Poucos métodos permitem avaliar impactos de modo integrado, em bases analíticas e quantitativas, com expressão de índices aplicados à gestão ambiental e análise de sustentabilidade dos empreendimentos aquícolas. A análise parcial ou disciplinar de parâmetros específicos, sem visão de conjunto dos efeitos da atividade podem não refletir as interações que ocorrem em diferentes contextos produtivos nos estabelecimentos. Ou seja, alguns aspectos podem ser identificados, com proposição de medidas corretivas, enquanto outros não serão contemplados. Por isso, as metas de sustentabilidade devem ser estabelecidas respeitando-se não apenas os critérios ambientais, mas também aspectos de natureza econômica e social vinculados às atividades produtivas em prática.

Nesse sentido, foi desenvolvido um método de avaliação ponderada de impacto ambiental de atividades rurais denominado APOIA-NovoRural (Rodrigues; Campanhola, 2003). O sistema de indicadores tem como objetivo analisar a qualidade ambiental e o desempenho produtivo na escala dos estabelecimentos rurais e sua vizinhança imediata, em conformidade com os fundamentos quantitativos da Avaliação de Impactos Ambientais - AIA (Campanhola et al., 2004).

Em estudos de validação, APOIA NovoRural permitiu identificar, para atividades tipicamente agrícolas (horticultura), mistas agropecuárias/não agrícolas (pesque-pague), bem como atividades tipicamente não agrícolas (agroturismo), os valores de desempenho de cada conjunto de indicadores, com o objetivo de subsidiar revisões e formulações de políticas públicas para contribuir para prática sustentável das atividades rurais. Com relação aos estabelecimentos de pesque-pague, de maneira geral, os índices referentes às dimensões Ecologia de Paisagem, Valores Socioculturais, e Gestão e Administração poderiam ser sensivelmente melhorados com a adoção de algumas medidas práticas quanto à legalização e efetiva preservação das áreas de reserva legal e habitats naturais, melhoramento do acesso dos trabalhadores à educação, lazer e serviços básicos, implantação de sistemas de controle de despesas e receitas, busca de apoio técnico nas áreas de piscicultura e pesca esportiva, e apoio legal e jurí-

dico para a regulamentação da atividade de acordo com a legislação em vigor (Rodrigues et al., 2003; Queiroz et al., 2006b).

Rodrigues et al. (2005, 2008) e Rodrigues e Antunes (2005) também utilizaram o APOIA-NovoRural para realizar estudos dirigidos à gestão ambiental da Área de Proteção Ambiental (APA) da Barra do Rio Mamanguape (Paraíba, Brasil), visando à consolidação do Plano de Gestão Estratégica para essa Unidade de Conservação. O conjunto dos resultados foi organizado em um documento síntese de gestão ambiental territorial, apresentado em reuniões abertas realizadas com os atores sociais envolvidos, contribuindo para a conformação da base de dados para a formulação do Plano de Manejo da APA, no que concerne às atividades rurais, dentre elas a criação de camarões marinhos (Frighetto; Queiroz, 2005; Queiroz; Frighetto, 2005).

O Sistema APOIA-NovoRural tem sido aperfeiçoado em numerosos estudos nos contextos ambientais e produtivos mais variados (Rodrigues et al., 2010), e complementado com indicadores específicos em um módulo dedicado à aquicultura (APOIA-Aquicultura) (Portinho et al., 2021).

Esses desenvolvimentos visam subsidiar a Rede Nacional de Monitoramento Ambiental da Aquicultura em Reservatórios Brasileiros, que o Ministério da Pesca e Aquicultura (MPA) implantou nas águas da União cedidas para atividade aquícola. Com base nesse tipo de análise integrada, as recomendações de manejo e adoção tecnológica tornam-se mais consistentes e eficazes, favorecendo a tomada de decisão e a correção do manejo produtivo (Portinho et al., 2021).

## SISTEMA INFORMATIZADO DE APOIO ÀS BPM E GESTÃO AMBIENTAL DA AQUICULTURA E INCLUSÃO DIGITAL DE PISCICULTORES

No âmbito das atividades de promoção à inovação da cadeia produtiva da aquicultura, a Embrapa Meio Ambiente atendeu à necessidade de disponibilizar informação, métodos, sistemas computacionais e plataformas tecnológicas que contribuíssem para a rápida difusão de conhecimentos gerados por pesquisas da Unidade (e parceiros) para os piscicultores do país. Essas ações foram iniciadas há vários anos, quando a Unidade idealizou e submeteu à Secretaria Especial de Aquicultura e Pesca da Presidência da República (SEAP/PR), em 2006, o projeto Plataforma Tecnológica de Apoio à Gestão Ambiental da Aquicultura (Plataforma AMBI-Aqui). Essa proposta foi adaptada da proposta do projeto Sistema de informações ambientais de apoio à certificação das Boas Práticas Agrícolas de Controle e da Produção Integrada no Campo (Projesia), elaborado em 2000 e submetido à Coordenação Técnica da Programação de Qualidade Ambiental da Embrapa. O Projesia tinha foco no desenvolvimento de

um sistema de informações ambientais (hospedado em site com acesso via Internet e contendo Bancos de Dados (com dados captados por telemetria, mapas georreferenciados e Sistemas Especialistas (técnica de Inteligência Artificial (IA)), entre outras), para apoiar a certificação de Boas Práticas Agrícolas e de Controle, levando em consideração a proposta de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC), e a Produção Integrada no Campo; ambas também conduzidas em projetos liderados pela Embrapa Meio Ambiente à época.

A Plataforma AMBI-Aqui foi encaminhada pela primeira vez à SEAP-PR em 2006. Embora não tenha sido aprovada, foi posteriormente submetida à chamada do Sistema Embrapa de Gestão e, então, aprovada como o Plano de Ação 5 Desenvolvimento de um sistema informatizado para a gestão ambiental da aquicultura com base em Boas Práticas de Manejo (BPM) do Projeto Componente Manejo e Gestão Ambiental da Aquicultura (PCMan) liderado pela Embrapa Meio Ambiente, e pertencente ao Projeto em Rede Bases tecnológicas para o desenvolvimento sustentável da Aquicultura no Brasil - Rede AquaBrasil, liderado pela Embrapa Pantanal.

As atividades previstas do PCMan foram realizadas com sucesso. Nele um sistema especialista foi desenvolvido, em linguagem *C Language Integrated Production System- CLIPS*, como ferramenta de apoio às Boas Práticas de Manejo da tilapicultura com foco no manejo da qualidade da água em sistema de produção de tilápia em viveiros escavados (Seixas et al., 2009). O uso desse sistema especialista demandaria uma alfabetização digital mínima do piscicultor, para viabilizar instalação e uso. Contudo, ao longo dos primeiros anos da condução dessa atividade de desenvolvimento, observou-se também a ausência de alfabetização digital para a maioria dos produtores nacionais.

Desse modo, foi também desenvolvido, pela mesma equipe, um sistema informatizado denominado Aquisys, de acesso *online* via *Web*, para viabilizar o conteúdo anterior entre outros elencados posteriormente, com base em informações do sistema de manejo e cultivo de peixes; estes, disponíveis à época em literatura técnico-científica de referência. Assim, o sistema Aquisys foi desenvolvido para subsidiar avaliações expeditas do sistema de produção de tilápia em viveiros escavados relacionadas às características da propriedade/local de produção e de avaliações rápidas do sistema produtivo. Ao longo do seu desenvolvimento, várias versões intermediárias foram apresentadas em eventos técnico-científicos nacionais, incluindo em um workshop do Projeto em Rede AquaBrasil, e internacionais da área de aquicultura e de desenvolvimento de software (Pessoa et al., 2009, 2010, 2011; Seixas et al., 2009, 2010) até que a versão protótipo Aquisys (v.1.0) fosse disposta para realização de testes finais de acesso *online* externo restrito (login/senha para público específico (pesquisadores do projeto AquaBrasil e/ou especialistas convidados) para testes de validação de acesso externo e conteúdo).

Os testes realizados sinalizaram que o conteúdo indicado pelo sistema Aquisys v.1.0 atendia somente às áreas produtoras pontuais de São Paulo e de Santa Catarina. Como o acesso público *online* pretendido inicialmente para esse sistema informatizado destinava-se aos produtores de tilápia em viveiros escavados de todo Brasil, e por não existir tempo para aprofundar a atividade de validação de conteúdo junto a um maior número de pesquisadores e produtores de tilápia em viveiros escavados do país, a versão Aquisys v.1.0 foi entregue em 2012 com o status de “em desenvolvimento” (Catálogo de Software da Embrapa-CATSOF RN nº19, 18/out/2012; ID Ainfo 12222/2012) ao final do projeto AquaBrasil (agosto/2012) (Resende; Queiroz, 2012).

Assim, o Aquisys v.1.0 não foi disponibilizado para acesso público externo ao final do projeto AquaBrasil. Com o insucesso da concretização da proposta da Rede AquaBrasil II, para dar continuidade às ações da Rede AquaBrasil, o novo projeto Validação do sistema informatizado para a gestão ambiental da aquicultura com base em Boas Práticas de Manejo (BPM) com foco em tilapicultura - Aquisys (Projeto Validação do Sistema Aquisys) foi elaborado em 2012 e submetido à Embrapa após o envio do relatório técnico final do projeto AquaBrasil (setembro/2012) (Resende; Queiroz, 2012). Esse projeto foi aprovado no final de 2012 e teve início em março de 2013, com duração até setembro/2015. Suas atividades atendiam à demanda urgente de revisão do conteúdo, telas e adequação de termos, bem como de maior atenção às orientações fornecidas para o sistema de manejo de viveiros escavados pelo sistema Aquisys v.1.0 e validação junto a produtores. Deste modo, o Projeto Validação do Sistema Aquisys foi realizado e apresentou seus dois resultados esperados: o software Aquisys validado e um método para prover a inclusão digital de produtores de tilápia pelo uso do software Aquisys validado. Contou com atividades de responsabilidade de pesquisadores da área de aquicultura da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios - APTA/Polo Regional Leste Paulista de Monte Alegre do Sul, São Paulo, bem como das Embrapa Meio Ambiente, Agropecuária Oeste, Pesca e Aquicultura, Amazônia Ocidental e Tabuleiros Costeiros.

As atividades de avaliação do conteúdo do Aquisys evidenciaram que, embora atendendo às instruções disponibilizadas por vários manuais da área de piscicultura e livros técnicos ainda em uso à época, não mais correspondiam àquelas da realidade local do sistema de produção alvo em suas áreas produtoras, exigindo validação em importantes áreas nacionais do sistema de produção de tilápia em viveiros escavados. Desse modo, realizou as readequações, reformulações, codificações e validações de conteúdo (técnico, visual e linguagem) e de acesso (por vários recursos computacionais e em diferentes localidades do Brasil) junto a produtores de tilápia em viveiros escavados de São Paulo (incluindo na Associação de Piscicultores de Itapira - ASPI) e aos pesquisadores, produtores e extensionistas de áreas de destaque nacional desse sistema de produção (do Oeste do estado do Paraná e do Noroeste do estado de

São Paulo) e de áreas de produção familiar no Nordeste e de Unidades da Embrapa e Universidades; entre outras áreas, validadas por contato a produtores/pesquisadores em grandes eventos da área de aquicultura (Congresso Brasileiro de Aquicultura e Biologia Aquática - Aquaciência 2014; considerado um dos maiores eventos mundiais da área de aquicultura).

Assim sendo, outras versões intermediárias do Aquisys foram disponibilizadas pelo Projeto Validação do Sistema Aquisys e igualmente submetidas aos processos de validações e codificações até atender ao conteúdo e formato adequados à compreensão e às principais demandas de seu público-alvo de áreas produtoras do país (Pessoa et al., 2014, 2015).

O desenvolvimento e validação do sistema foram concluídos com a apresentação do Sistema Informatizado de apoio às Boas Práticas de Manejo e Gestão Ambiental da Aquicultura com foco em tilápia em viveiro escavado - Aquisys v.1.3, disposto para acesso público *online* em maio/2015 no site <http://www.cnpma.embrapa.br/aquisys/> (CATSOFT v.2.0 30/05/2015) (Certificado de Registro de Programa de Computador INPI nº: BR 51 2018 000753-8; expedido em 29/05/2018). O Projeto Validação do Sistema Aquisys também realizou um Dia-de-Campo na TV e um Prosa Rural, veículos de difusão da Embrapa para produtores, para informar e capacitar piscicultores para o uso do Aquisys v.1.3 (Pessoa; Losekann, 2016a, 2016b). Em 2019, o Aquisys v.1.3 foi finalista do Prêmio “Inovação Aquícola - as melhores iniciativas do setor 2019” (da *Aquaculture* Brasil, *Aquishow* Brasil e *Seafood* Brasil), tendo ficado em 3º. lugar na Categoria “Políticas Institucionais” e, assim, reconhecido pela cadeia produtiva como importante ferramenta para o piscicultor nacional.

Ainda no âmbito dos resultados esperados pelo Projeto Validação do Sistema Aquisys, o “Método para promover a inclusão digital de produtores de tilápia pelo uso do Aquisys v.1.3” foi também disponibilizado (Pessoa et al., 2016, 2018). O método apresentou ações diferenciadas e sinérgicas para viabilizar a elaboração ou acesso à cursos de inclusão digital para áreas piscícolas brasileiras, utilizando o Aquisys v.1.3 como um instrumento atrativo às práticas a serem conduzidas. Portanto, fomentou o uso do Aquisys v.1.3, que poderia ser acessado de *smartphones* (entre outros recursos) de forma gratuita, como um motivador para elevar a inserção, a permanência e o maior interesse desses usuários nas atividades de inclusão digital a serem realizadas.

O método também apresentou estratégias distintas para prover os cursos de inclusão digital, considerando as oportunidades aos acessos locais à Internet, as diferentes faixas etárias das pessoas a serem capacitadas e a disponibilidade de projetos de inclusão digital existentes, à época, no país. Do mesmo modo, considerou os diferentes níveis educacionais dos produtores de tilápia, também identificados pelo Projeto Validação do Sistema Aquisys, propondo ações distintas para a inclusão digital de jovens (filhos de produtores) e adultos (produtores entre 21 e 60 anos e produtores na terceira

idade), examinando métodos validados disponíveis em literatura e indicando-os conforme cada fase. Também indicou as ações necessárias para iniciar novos projetos de inclusão digital, com base na composição de turmas conforme o grau de alfabetização digital dos participantes. Assim apresentado, o método focava atender mais rapidamente à carência de inclusão digital de piscicultores, com maior expectativa de sucesso, fomentando oportunidades ao maior acesso à informação, concomitantemente ao mais rápido acesso ao conhecimento de BPM; com consequente adoção de práticas sustentáveis na propriedade. O método de inclusão digital foi apresentado no “Congresso Brasileiro de Aquicultura e Biologia Aquática - tema: um olhar para a inovação” (Aquaciência 2018), tendo recebido o 1º lugar em pôster da categoria “Profissional”.

A estrutura do Aquisys v.1.3 facilita a inclusão/remoção de novas funcionalidades no seu código fonte computacional, sem demandar a inacessibilidade total das rotinas já disponibilizada a seus usuários. Por essa razão, está em desenvolvimento o Plano de Ação 12 “Novas rotinas do software Aquisys para BPM para a produção de tambaqui em viveiros escavados do nordeste e de tilápia em tanques-rede de responsabilidade da Embrapa Meio Ambiente, no Projeto Componente Manejo e Gestão Ambiental (PCMAN) liderado pela Embrapa Meio Ambiente; pertencente ao Projeto em Rede Ações estruturantes e inovação para o fortalecimento das cadeias produtivas da Aquicultura no Brasil (BRSAqua), liderado pela Embrapa Pesca e Aquicultura e financiado pela Embrapa e Banco Nacional de Desenvolvimento Social (BNDES).

O desenvolvimento dessas novas funcionalidades conta com as parcerias da APTA/Polo Regional Leste Paulista de Monte Alegre do Sul e das Embrapa Tabuleiros Costeiros e Agropecuária Oeste. Essas funcionalidades ampliarão as informações e avaliações expeditas de práticas locais (manejo, qualidade água, lucratividade) do usuário, conforme conjuntos mínimos de Boas Práticas de Manejo e Gestão Ambiental passíveis de adoção na propriedade piscícola também formuladas para os novos sistemas de produção-alvo, gerando o novo ativo de inovação: “Aquisys v.1.3 BRSAqua” (Cadastrado no CATSOFT em 22/05/2020). O PA12 previu atividades de difusão junto aos piscicultores de tilápia em tanque-rede realizadas em parceria com instituições públicas paulistas, que irão colaborar no suporte e apoio à realização de atividades de capacitação do uso das novas funcionalidades previstas e de multiplicadores para promover treinamentos junto aos piscicultores do Estado e entorno; além das demais previstas para outras áreas do país.

## SISTEMA INTEGRADO DE MONITORAMENTO AMBIENTAL (SIMA) E REDE DE PESQUISA EM AQUICULTURA EM ÁGUAS DA UNIÃO

Dado o potencial de contaminação do sistema de produção de peixes em tanques-rede devido ao possível acúmulo de nutrientes no meio, o monitoramento de carbono, nitrogênio e fósforo, assim como de elementos potencialmente tóxicos consiste em informação importante para tomada de decisão quanto às melhores práticas de manejo a serem adotadas (Boyd; Queiroz, 2001b; Boyd et al., 2010).

Normalmente, o monitoramento da qualidade da água consiste na coleta de amostras em tempos definidos e consequente análise laboratorial (Baird et al., 2012). Este procedimento, por melhor e mais frequente que seja feito, apresenta uma imagem do momento das coletas, que muitas vezes não representam as pequenas variações físico, químicas e biológicas que podem ocorrer nos reservatórios devido às mudanças tanto por influência antrópica, como decorrentes das variações naturais do meio. Essas questões remetem a uma das principais demandas da Secretaria de Aquicultura e Pesca (SAP) a Rede Nacional de Monitoramento Ambiental da Aquicultura em Águas da União (Sampaio et al., 2019a, 2019b, 2019d).

Para atender essa demanda em 14 de abril de 2008 foi apresentada uma palestra pelos pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), sobre o “Potencial do sensoriamento remoto hiperespectral para aplicações em agricultura e meio ambiente”, com destaque, para suas aplicações no monitoramento da aquicultura. A grande diferença entre o que faziam os pesquisadores da Embrapa, nas coletas e medições dos parâmetros de qualidade de água nos ambientes onde se praticava a aquicultura, e o que faziam os pesquisadores do Inpe, era exatamente a frequência com que eram obtidas e registradas as medidas. Enquanto as amostras para fins de aquicultura eram coletadas uma vez por dia em cada local, com espaçamento de dias e até semanas entre as coletas, o Inpe estava coletando as mesmas informações continuamente, em intervalos de minutos, 24 horas por dia, por vários meses.

Diante dessa constatação, ficou evidente a necessidade de desenvolvimento de técnicas que permitissem o monitoramento de alta frequência da qualidade de água nos ambientes de produção aquícola. Assim, foi elaborado um projeto conjunto que objetivava adaptar a tecnologia do SIMA (Sistema Integrado de Monitoramento Ambiental), desenvolvida pelo Inpe, para aplicação em pisciculturas em tanques-rede no reservatório de Furnas, MG.

Para alcance desse objetivo diversas ações de pesquisa foram desenvolvidas incluindo o reconhecimento do estado do uso e ocupação do reservatório de Furnas,

pela piscicultura, envolvendo expedições de visita a todos os piscicultores instalados no reservatório entre os anos de 2011 e 2012.

A área objeto de estudo compreendeu quatro braços do reservatório de Furnas, todos localizados no braço do Rio Grande sendo uma área controle, ausente de pisciculturas e 3 áreas com produção de tilápia em tanques-rede. No ano de 2013 foram fundeadas um conjunto de seis Plataformas de Coleta de Dados (PCD), sendo uma delas o SIMA, permitindo transmissão dos dados limnológicos e meteorológicos em tempo real via satélite, e as demais registrando e armazenando os parâmetros limnológicos para posterior download. Dados oriundos do sistema foram utilizados como exemplo para o estudo de uma série temporal da temperatura da água, com objetivo de avaliar sua adequação à produção aquícola (Cara et al., 2013). Ao longo de 2 anos foram feitas a operação dos equipamentos, incluindo, toda manutenção, calibração e download dos dados para acompanhamento em tempo real dos parâmetros monitorados pelo SIMA e pelas Plataformas Secundárias foi desenvolvido um banco de dados <http://www.dsr.inpe.br/hidrosfera/aquicultura/>.

Destacam-se, como resultados e avanços obtidos na execução do Projeto: diagnóstico in loco sobre o uso e ocupação do reservatório de Furnas pela aquicultura (Losekann et al., 2014); uso de Imagens Oli/Landsat-8 e PCD limnológicos no monitoramento ambiental da piscicultura em tanques-rede (Leão et al., 2015); definição das microbacias de influência no entorno das áreas monitoradas, e identificação dos usos múltiplos; diagnóstico da produção agropecuária e possíveis contribuições destas atividades no recurso hídrico utilizado pela piscicultura (Salgado et al., 2013); classificação de parques aquícolas em função da resposta espectral multitemporal e definição de possíveis áreas sujeitas ou consideradas eutrofizadas (Bacega et al., 2013); construção e fundeio de um SIMA Aquicultura para monitoramento em tempo quase real de parâmetros limnológicos (Lorenzetti et al., 2014); desenvolvimento de um método para aplicação prática de dados coletados em alta frequência para a compreensão das variáveis em função da piscicultura em reservatório (Coutinho, 2015); monitoramento da emissão de gases de efeito estufa com ênfase na produção de metano (Ferreira et al., 2014; Silva et al. 2018); uso de imagens de satélite e dados limnológicos para o monitoramento da qualidade da água em áreas de produção aquícola (Lorenzetti; Coutinho, 2015; Costa, 2016); geração de dados inéditos sobre a influência da entrada de frentes frias nos processos de estratificação e mistura da coluna de água no cultivo de peixes (Araújo et al., 2017); a aplicação de técnicas de biomonitoramento com variáveis fisiológicas dos peixes demonstraram que não houve influência das alterações ambientais (Donetti et al., 2013; Gonçalves et al., 2013b, 2014); avaliação da dinâmica de metais potencialmente tóxicos em sedimentos da área de influência direta dos tanques-rede (Silva et al., 2014a); desenvolvimento de métodos para avaliação de resíduos de antimicrobianos dos filés de tilápias cultivados no reservatório (Orlando et al., 2016); monitoramento da

macrofauna bentônica e aplicação de métricas da estrutura da comunidade na área de influência direta (Carvalho et al., 2014; Silva et al., 2014b, 2014c); desenvolvido de um Sistema de Avaliação Ponderada de Impacto Ambiental (APOIA) específico para BPM em tanques-rede; avaliação dos impactos ambientais junto aos atores sociais envolvidos com o Parque Aquícola em levantamentos de campo subsidiados por indicadores (Rodrigues et al., 2013); identificação e análise das vantagens competitivas em empresas de aquicultura (Paseto, et al., 2016); geração de relatório global de planejamento estratégico como modelo de aplicação aos diversos contextos produtivos dos Parques Aquícolas na esfera Federal; e proposta de criação de uma Rede Nacional de Pesquisa e Monitoramento Ambiental da Aquicultura em Águas da União.

Também foi feita a comparação dos métodos de monitoramento de variáveis limnológicas em alta e baixa frequência, e verificou-se divergências nas séries geradas para os parâmetros limnológicos entre os dois métodos, concluindo que há a necessidade de revisão da resolução Conama 413/2009, que dispõe sobre o licenciamento ambiental da aquicultura para que novos processos de monitoramento mais adequados e efetivos sejam utilizados (Sampaio et al., 2021).

Ressalta-se o pioneirismo do Projeto Furnas em monitorar parâmetros limnológicos em alta frequência e no uso de dados meteorológicos para compreender sua influência na gestão da aquicultura. Foram colhidos resultados inéditos no monitoramento da aquicultura e mais de vinte instituições parcerias e 80 colaboradores diretos, entre pesquisadores, docentes, colaboradores, pesquisadores e bolsistas envolvidos. Mais de 9 milhões de dados foram gerados, e em função da complexidade de análise mais resultados serão publicados estando os dados disponíveis em modo aberto para futuros usos.

A política aquícola nacional visa garantir ao produtor áreas ordenadas e legalizadas para o desenvolvimento da atividade praticada em águas públicas. Diante disso, foi normatizada pelo Decreto n. 4.895 de 2003, que dispõe sobre a autorização de uso de espaços físicos de corpos d'água de domínio da União para fins de aquicultura, regulamentado pela Instrução Normativa Interministerial n. 6 de 2004, que estabelece as normas complementares para a autorização de uso dos espaços físicos em corpos d'água de domínio da União para fins de aquicultura (Brasil, 2018).

A criação da Rede Nacional de Pesquisa e Monitoramento Ambiental da Aquicultura em Águas da União (Rede) foi primordial para a avaliação contínua dos impactos ambientais. Essa iniciativa envolveu a configuração da Rede em termos de número e localização dos reservatórios e estações de monitoramento, frequência de monitoramento, parâmetros a serem monitorados, tipo de análise, interpretação e divulgação dos resultados, e também para a seleção de instituições públicas e privadas com habilidades técnicas para compor a Rede e, ainda, uma política de acesso e disponibilidade de dados e das informações geradas (Sampaio et al., 2019c).

A proposição da Rede teve como base a necessidade de uma maior organização entre os atores envolvidos na temática de monitoramento ambiental da aquicultura em águas da União para compreensão dos modelos de monitoramento, dos parâmetros a serem monitorados e da discussão dos dados gerados. Somado a isso havia a necessidade do Ministério da Pesca e Aquicultura (MPA) de cumprir as condicionantes dos licenciamentos ambientais dos parques aquícolas com concessão em seu nome e que em sua maioria exigem planos de monitoramento ambiental. Desta forma, foi proposto um arranjo multi-institucional que inicialmente focou em identificar e organizar as instituições de ensino e pesquisa que trabalhassem no tema e, que em sua maioria, já estavam executando o monitoramento de parques aquícolas por demanda do próprio MPA. Também foi resultante deste trabalho em parceria com o Projeto da FAO o levantamento de modelos de regulamentação e monitoramento adotados por governos de outros países, nos permitindo compreender como está o Brasil diante dos parceiros globais (Silva; Sampaio, 2019).

A direção da Rede foi feita pela Secretaria de Aquicultura e da Pesca do Mapa, contando com o apoio da Embrapa Meio Ambiente na coordenação técnico e científico. A Rede é composta por quatro coordenações regionais (CR) representadas por pesquisadores no tema em nível regional, atualmente na Rede Nordeste as ações são coordenadas pela Embrapa Semiárido e pelo Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP), na Rede Sudeste pelo Instituto de Pesca e Embrapa Meio Ambiente, no Centro-Oeste pela Universidade Federal de Goiás e Embrapa Pesca e Aquicultura e no Sul pela Universidade do Vale do Itajaí e Embrapa Meio Ambiente. No arranjo institucional, os pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente, sempre estiveram à frente da coordenação técnico-científica da Rede. Além disso, foi inserido como parte de suas atividades de pesquisa no âmbito do projeto BRS-Aqua, financiado com recursos do Funtec-BNDES, SEAP/SG/PR, Embrapa e CNPq, um componente específico de Manejo e Gestão Ambiental da aquicultura. Sendo que parte das ações de pesquisa foram focadas em desenvolvimento tecnológicos para o monitoramento ambiental da aquicultura, incluindo desenvolvimento de ferramentas para o monitoramento por imagens de satélite, o biomonitoramento e softwares para suporte na coleta de informações no campo, além do apoio a estruturação da Rede com destaque nas ações dos GGR.

Desde 2018 coletas a campo nos reservatórios de Ilha Solteira e Chavantes vem sendo realizadas para avaliação da qualidade da água e do sedimento aquático, com o objetivo de elaborar um protocolo de biomonitoramento com uso de macroinvertebrados aquáticos. Os pontos de coleta estabelecidos nestes reservatórios incluem áreas de produção (próximo aos tanques rede) e áreas controle (em rios de contribuição às áreas de produção e áreas distantes dos tanques rede). Silva et al. (2021) descrevem o protocolo usado no biomonitoramento dos reservatórios no BRS Aqua.

Além disso, foi desenvolvido e disponibilizado um banco de dados digitalizado para armazenamento de informações, análise e interpretação dos resultados e seleção de índices físicos, químicos e biológicos de qualidade da água em viveiros escavados do interior paulista dos parques aquícolas (Crecci et al., 2018). Recentemente, foi disponibilizado o sistema *web* para gestão do banco de dados para avaliação da qualidade da água na piscicultura em reservatórios.

Parte dos esforços já realizados pela Rede foram apresentados no livro “Monitoramento Ambiental da Aquicultura em Águas da União - Subsídios para a Proposição de um Plano Nacional de Monitoramento Ambiental da Aquicultura” (Sampaio et al., 2019a) onde é apresentada uma revisão técnico científica sobre monitoramento ambiental da aquicultura, as legislações nacionais que incidem sobre o tema, os exemplos de planos internacionais de monitoramento e a proposição de um modelo de monitoramento em âmbito nacional.

A publicação, intitulada “Monitoramento Ambiental da Aquicultura em Águas da União - Realidade Brasileira” (Sampaio et al., 2019b) é um portfólio de resultados de dados sobre o monitoramento ambiental da aquicultura em águas da União continentais e marinha. O Portfólio está dividido em resultados apresentados para a piscicultura em tanques rede em reservatórios e a aquicultura marinha que envolveu informações de malacocultura, piscicultura e algicultura. Este conjunto de informações já permite a Rede promover uma ampla discussão sobre questões de ordenamento sustentável da aquicultura em águas da União. Por exemplo, existem trabalhos que destacam claramente a problemática da instalação da piscicultura em pequenos açudes no semiárido, a influência da diminuição do volume útil dos reservatórios no impacto da atividade e, principalmente, que a atividade pode ser instalada em locais de modo a não causar impactos substanciais. Porém, o principal propósito desta iniciativa é trazer à tona os modelos atualmente adotados no processo de monitoramento ambiental da atividade e discutir junto aos atores da Rede qual caminho devemos seguir.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A multidisciplinaridade dos temas que compõem os projetos de pesquisa executados pela Embrapa Meio Ambiente remete a necessidade da presença de uma equipe com especialização em áreas muito distintas. A própria missão da Embrapa Meio Ambiente a qualifica, portanto, para atuar em temas abrangentes e definidos como mandatários no seu planejamento estratégico de PD&I, como por exemplo, manejo e gestão de recursos hídricos. Atualmente, a Embrapa Meio Ambiente está à frente da coordenação de vários projetos nessa área. A gestão sustentável da água requer uma estrutura plurifocal, isto é, diferentes áreas das ciências focadas na gestão da água.

Nesse sentido, muitos esforços foram feitos a partir da execução de projetos de pesquisa, como por exemplo, o Projeto AquaBrasil e o Projeto BRS-Aqua que tiveram como objetivos estabelecer, respectivamente, as *Bases para o Desenvolvimento Sustentável da Aquicultura no Brasil, por meio da proposição e validação de Boas Práticas de Manejo (BPM) para gestão ambiental da aquicultura, e o Fortalecimento da Política de Desenvolvimento Produtivo da Aquicultura no Brasil.*

Nesse panorama, a questão principal deixou de ser a implantação de um Laboratório de Referência de Água na Embrapa Meio Ambiente e, passou a ser buscar formas para potencializar o uso da infraestrutura e dos equipamentos já existentes na Unidade. A prioridade foi utilizar estratégias mais eficientes para potencializar, de um lado, a atuação dos diferentes especialistas no tema água, em todas as suas vertentes e usos, que perpassam mais de um projeto de pesquisa e, de outro, o caráter de dedicação múltiplo de equipamentos (isto é, atendimento a diferentes demandas de projetos de pesquisa) já existentes na Unidade.

Um dos pontos positivos foi induzir a execução de ações de pesquisa de forma afinada e sistêmica, facilitando a participação de especialistas tanto da Embrapa quanto de instituições parceiras, bem como, oferecer oportunidades de prospecção de novas demandas. Como resultado, esses projetos contribuíram para a congregação de um grupo de pesquisadores e especialistas, e também de analistas e assistentes, que estão atuando em torno de um tema comum que, é o uso múltiplo e racional da água como fonte de produção de alimentos, insumos e energia.

## REFERÊNCIAS

- AMORIM, L. C. A. Os biomarcadores e sua aplicação na avaliação da exposição aos agentes químicos ambientais. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, v. 6, n. 2, p. 158-170, 2003.
- ARAÚJO, C. A. S.; SAMPAIO, F. G.; ALCÂNTARA, E.; CURTARELLI, M. P.; OGASHAWARA, I.; STECH, J. L. Effects of atmospheric cold fronts on stratification and water quality of a tropical reservoir: implications for aquaculture. *Aquaculture Environment Interactions*, v. 9, p. 385-403, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PISCICULTURA. *Anuário Peixe BR da Piscicultura 2023*. São Paulo: 2023. 127 p.
- AVNIMELECH, Y. *Biofloc technology: a practical guidebook*. 2nd ed. Baton Rouge: World Aquaculture Society, 2012. 258 p.
- BACEGA, A. de O.; NEVES, M. C.; LUIZ, A. J. B. Classificação de parques aquícolas na represa de Furnas em função da resposta espectral multitemporal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. *Anais... Foz do Iguaçu: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*, 2013. p. 5435-5442.
- BAIRD, R. B.; RICE, E. W.; EATON, A. D.; CLESCERI, L.S. (ed.). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, DC: American Public Health Association, 2012. Paginação irregular.
- BIANCHI, M. B.; JERÔNIMO, G. T.; PÁDUA, S.B.; SATAKE, F.; ISHIKAWA, M. M.; TAVARES-DIAS, M.; MARTINS, M. L. Hematological profile in farmed Sorubim lima: reference intervals, cell morphology and cytochemistry. *Veterinarski Arhiv*, v. 84, n. 6, p. 677-690, 2014.
- BITTENCOURT, F. de O.; FRIGHETTO, R. T. S.; QUEIROZ, J. F. de; LOSEKANN, M. E.; LUIZ, A. J. B.; ALMEIDA, E. A. PROD and BROD Modulation in Nile Tilapia after Exposure to 17 B Estradiol. *Journal of Life Sciences*, v. 5, n. 4, p. 287-290, 2011a.
- BITTENCOURT, F. de O.; FRIGHETTO, R. T. S.; QUEIROZ, J. F. de; LOSEKANN, M. E.; LUIZ, A. J. B.; ALMEIDA, E. A. de; PALHARES, J. C. P. *Enzimas de biotransformação em tilápia (Oreochromis niloticus) exposta ao hormônio natural 17-estradiol*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011b. 32 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 61).
- BONIN, M. C. B.; PENTEADO, A. L.; QUEIROZ, S. C. N. Avaliação da atividade antagonista de bactérias ácido lácticas e seus metabólitos frente a patógenos de origem animal. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 10, p. 18511-18525, 2019.
- BOYD, C. E.; D'ABRAMO, L. R.; GLENCROSS, B. D.; HUYBEN, D. C.; JUAREZ, L. M.; LOCKWOOD, G. S.; MCNEVIN, A. A.; TACON, A. G. J.; TELETCHEA, F.; TOMASSO, J. R.; TUCKER, C. S.; VALENTI, W. C. Achieving sustainable Aquaculture: historical and current perspectives and future needs and challenges. *Journal of the World Aquaculture Society*, v. 51, n. 3, p. 578-633, 2020.
- BOYD, C. E.; LIM, C.; QUEIROZ, J. F. de.; SALIE, K.; WET, L.; McNEVIN, A. *Best management practices for responsible aquaculture*. Washington, DC: USAID: Aquaculture Collaborative Research Support Program, 2008. 47 p.

BOYD, C. E.; LIM, C.; SALIE, K.; WET, L.; QUEIROZ, J. F. de.; TAVARES, L. H. S. **Workshops on Guidelines for Developing Aquaculture Best Management Practices**: twenty-fourth annual technical report. Corvallis, OR: Aquaculture CRSP, Oregon State University, 2006. (Technical Report PD/A CRSP).

BOYD, C. E.; QUEIROZ, J. F. de. Feasibility of Retention Structures, Settling Basins, and Best Management Practices in Effluent Regulation for Alabama Channel Catfish Farming. **Reviews in Fisheries Science**, v. 9, n. 2, p. 43-67, 2001a.

BOYD, C. E.; QUEIROZ, J. F. de. Manejo das condições do sedimento do fundo e da qualidade da água e dos efluentes de viveiros. In: CYRINO, J. E. P.; URBINATI, E. C.; FRACALOSSO, D. M.; CASTAGNOLLI, N. (org.). **Tópicos especiais em piscicultura tropical intensiva**. Jaboticabal: Associação Brasileira de Aquicultura e Biologia, 2004. v. 1, p. 25-43.

BOYD, C. E.; QUEIROZ, J. F. de. Nitrogen, Phosphorus Loads Vary by System - USEPA Should Consider System Variables in Setting New Effluent Rules. **Global Aquaculture Advocate**, v. 4, n. 6, p. 84-86, 2001b.

BOYD, C. E.; QUEIROZ, J. F. de. The role and management of bottom soils in aquaculture ponds. **Infofish International**, v. 2, p. 22-28, 2014.

BOYD, C. E.; QUEIROZ, J. F. de.; LEE, J. Y.; ROWAN, M.; WHITIS, G. N.; GROSS, A. Environmental assessment of channel catfish *Ictalurus punctatus* farming in Alabama. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 31, n. 4, p. 511-544, 2000a.

BOYD, C. E.; QUEIROZ, J. F. de.; McNEVIN, A. Perspectives on the responsible aquaculture movement. **World Aquaculture**, v. 44, n. 4, p. 14-21, 2013.

BOYD, C. E.; QUEIROZ, J. F. de.; WHITIS, G. N.; HULCHER, R.; OAKES, P.; CARLISLE, J.; ODOM, D.; NELSON, M. M.; HEMSTREET, W. G. **Best management practices for channel catfish farming in Alabama**. Auburn: Alabama Agricultural Experiment Station: Alabama Catfish Producers, 2003. 38 p.

BOYD, C. E.; QUEIROZ, J. F. de.; WRIGHT, R. Managing Sport Fish Ponds to Lessen Nutrient Discharge to Streams. **Wildlife Trends: Practical Wildlife Management Information**, v. 2, n. 7, p. 13-15, 2002.

BOYD, C. E.; WHITIS, G. N.; QUEIROZ, J. F. de. An Assessment of the Environmental Impact of Alabama Channel Catfish Farming. **The Catfish Journal**, v. 15, n. 2, p. 14-18, 2000b.

BOYD, C. E.; WOOD, C. W.; CHANEY, P. L.; QUEIROZ, J. F. de. Role of aquaculture pond sediments in sequestration of annual global carbon emissions. **Environmental Pollution**, v. 158, p. 2537-2540, 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 13, de 30 de novembro de 2004. Aprova o regulamento técnico sobre aditivos para produtos destinados à alimentação animal. **Diário Oficial da União**, 1º dez. 2004. Seção 1, p. 63. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-pecuarios/alimentacao-animal/arquivos-alimentacao-animal/legislacao/instrucao-normativa-no-13-de-30-de-novembro-de-2004.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2021.

BRUM, A.; VENTURA, A. S.; PÁDUA, S. B.; ISHIKAWA, M. M.; MARTINS, M. L.; JERÔNIMO, G. T. Hematological parameters of the hybrid serrasalmids farmed in central-western Brazil. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 45, p. e504, 2019.

CAMPANHOLA, C.; RODRIGUES, G. S.; VALARINI, P. J.; FRIGHETTO, R. T S.; QUEIROZ, J. F.; TOLEDO, L. G.; RAMOS FILHO, L. O.; BROMBAL, J. C. Avaliação do impacto ambiental de atividades do novo rural. In: CAMPANHOLA, C.; SILVA, J. G. da (org.). **O novo rural brasileiro: novas atividades rurais**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. v. 6, p. 280-308.

CARA, B. E. D.; LUIZ, A. J. B.; NEVES, M. C. Método para expansão de uma série temporal de temperatura da água a partir de dados do sistema automático de monitoramento de variáveis ambientais (SIMA): aplicação em aquicultura no Reservatório de Furnas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. *Anais... Foz do Iguaçu: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*, 2013. p. 5491-5498.

CARDOSO, I. L. **Ácido cítrico em dietas para tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*)**. 2016. 59 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Aquidauana.

CARDOSO, I. L.; SOARES, M. P.; ANGELIS, C.; FERRI, G. H.; ISHIKAWA, M. M.; JONSSON, C. M.; RANTIN, F. T.; SAMPAIO, F. G. Physiological and biochemical responses of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to acute trichlorfon exposure. *International Aquatic Research*, v. 12, n. 4, p. 243-253, 2020.

CARRA, M. L.; SAMPAIO, F. G.; GONÇALVES, V. T.; DAL'BÓ, G. A.; LOSEKANN, M. E.; BORGHESI, R.; SUCASSAS, L. F.; OETTERER, M. Antioxidant defenses and hematological changes in pacu (*Piaractus mesopotamicus*) in response to different lipid sources. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE NUTRIÇÃO E SAÚDE DE PEIXES, 5., 2013, Botucatu. [Trabalhos apresentados...]. Botucatu: FMZ: UNESP, 2013.

CARVALHO, N. C.; SILVA, M. S. G. M. e; SONODA, K. C.; LOSEKANN, M. E.; SAMPAIO, F. G. Chironomidae (Diptera, Insecta) do reservatório de Furnas (MG) e sua relação com a qualidade da água. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 8., 2014, Campinas. *Anais... Campinas: Instituto Agronômico*, 2014. RE Nº 144II. 7 p.

CAVALETT, O.; QUEIROZ, J. F.; ORTEGA, E. Emergy accounting of fish aquaculture chains in Brazil. *Biologi Italiani*, v. 7, p. 53-61, 2007.

CAVALETT, O.; QUEIROZ, J. F.; ORTEGA, E. Emergy assessment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in the South Brazil. *Ecological Modelling*, v. 193, n. 3-4, p. 205-224, 2006.

CLEMENTE, Z.; CASTRO, V. L.; FEITOSA, L. O.; LIMA, R.; JONSSON, C. M.; N.MAIA, A. H.; FRACETO, L. F. Biomarker evaluation in fish after prolonged exposure to nano-tio2: influence of illumination conditions and crystal phase. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, v. 15, p. 5424-5433, 2015.

COUTINHO, L. S. **Estimativa dos fluxos de calor de superfície no Reservatório de Furnas/Guapé (MG), por meio de dados in situ e infravermelho termal orbital**. 2015. 92 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

COSTA, D. A. **Avaliação do uso de dados termais de sensoriamento remoto no modelo computacional Elcom configurado para o Reservatório de Furnas (MG)**. 2016. 118 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

CRAB, R.; CHIELENS, B.; WILLE, M.; BOSSIER, P.; VERSTRAETE, W. The effect of different carbon sources on the nutritional value of bioflocs, a feed for *Macrobrachium rosenbergii* postlarvae. **Aquaculture Research**, v. 41, n. 4, p. 559-567, 2010.

CRECCI, C.V.; SILVA, M.S.G.M.; LOSEKANN, M.E.; ISHIKAWA, M. M. **Sistema web para gestão de banco de dados para biomonitoramento na piscicultura em viveiros escavados**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2018. 21 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 115).

CYRINO, J. E. P.; BICUDO, A. J. A.; SADO, R. Y.; BORGHESI, R.; DAIRIKI, J. K. A piscicultura e o ambiente: o uso de alimentos ambientalmente corretos em piscicultura. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, p. 68-87, 2010. Suplemento especial.

DAL'BÓ, G. A.; SAMPAIO, F. G.; LOSEKANN, M. E.; QUEIROZ, J. F.; LUIZ, A. J. B.; WOLF, V. H. G.; GONÇALVES, V. T.; CARRA, M. L. Hematological and morphometric blood value of four cultured species of economically important tropical foodfish. **Neotropical Ichthyology**, v. 13, n. 2, p. 439-446, 2015.

DANTZGER, D. D.; DANTZGER, M.; JONSSON, C. M.; AOYAMA, H. In vitro effects of agriculture pollutants on microcrustacean and fish acid phosphatases. **Water Air and Soil Pollution**, v. 228, n. 10, article 391, 2017.

DANTZGER, D. D.; JONSSON, C. M.; AOYAMA, H. Mixtures of diflufenzuron and p-chloroaniline changes the activities of enzymes biomarkers on tilapia fish (*Oreochromis niloticus*) in the presence and absence of soil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 148, p. 367-376, 2018.

DELLA FLORA, M. A.; BORGHESI, R.; Hisano, H. **Pinhão-manso na alimentação de peixes: potencial e perspectivas**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2014. 43 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Documentos, 126).

DIANA, J. S.; EGNA, H. S.; CHOPIN, T.; PETERSON, M. S.; CAO, L.; POMEROY, R.; VERDEGEM, M.; SLACK, W. T.; BONDAD-REANTASO, M. G.; CABELLO, F. Responsible aquaculture in 2050: valuing local conditions and human innovations will be key to success. **BioScience**, v. 63, n. 4, p. 255-262, 2013.

DONETTI, L. de A. R.; SAMPAIO, F. G.; THOMAZ, J. M. Caracterização morfológica de brânquias de *Oreochromis niloticus* criadas em tanques redes no Reservatório de Furnas/MG. In: CONGRESSO NACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 13., 2013, Campinas. **Anais...** Campinas: Simesp, 2013. 4 p.

FERRACINI, V. L.; QUEIROZ, S. C. N.; ROSA, M. A.; SOUZA, D. R. C.; QUEIROZ, J. F.; PARAIBA, L. C. Análise de agrotóxicos organoclorados em camarão e pescado por cromatografia a gás com detector de micro captura de elétrons (GC- $\mu$ ECD). **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente** v. 24, p. 13-20, 2014.

FERREIRA, W. J.; BRAZ, L.; MARANI, L.; ALVALÁ, P. C.; PACKER, A. P. C.; SAMPAIO, F. G. Emissão de gases de efeito estufa na produção de pescados em tanques-rede no reservatório de Furnas. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE AQUICULTURA E BIOLOGIA AQUÁTICA, 6., 2014, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Aquicultura e Biologia Aquática, 2014.

FERRI, G. H.; CARDOSO, I. L.; GIL, J. A.; JONSSON, C. M.; RANTIN, F. T.; ISHIKAWA, M. M. Determination of acute median lethal concentration and sublethal effects on AChE activity of *Gymnotus carapo* (Teleostei: Gymnotidae) exposed to trichlorfon. **Brazilian Journal Veterinary Research and Animal Science**, v. 57, n. 3, p. e169354, 2020.

FRASCA-SCORVO, C. M. D.; LOSEKANN, M. E.; QUEIROZ, J. F. de; SCORVO Filho, J. D.; TURCO, P. G. N. **Avaliação da frequência alimentar no desempenho de tilápia em uma represa rural.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2017a. 17 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 75).

FRASCA-SCORVO, C. M. D.; QUEIROZ, J. F. de; LOSEKANN, M. E. Boas práticas de manejo (BPM) aplicadas à qualidade da água da aquicultura em viveiros e tanques-rede instalados em reservatórios. In: AYROZA, L. M. S. (coord.). **Piscicultura.** Campinas: CATI, 2011. p. 161-174.

FRASCA-SCORVO, C. M. D.; QUEIROZ, J. F. de; LOSEKANN, M. E. Manejos de tilápia em tanques-rede em represa rural do leste paulista: estudo de caso. **Pesquisa & Tecnologia**, v. 16, n. 2, p. 1-5, jul./dez. 2019.

FRASCA-SCORVO, C. M. D.; QUEIROZ, J. F. de; LOSEKANN, M. E.; SCORVO FILHO, J. D.; TURCO, P. H. N.; LUIZ, A. J. B. **Efeito da frequência alimentar no desempenho produtivo de diferentes linhagens de tilápia.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2017b. 18 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 76).

FRASCA-SCORVO, C. M.; SCORVO FILHO, J. D.; DONADELLI, A.; TURCO, P. H. N.; **Piscicultura em tanques rede em represas rurais.** **Pesquisa & Tecnologia**, v. 9, n. 1, p. 1-5, 2012.

FRASCA-SCORVO, C. M. D.; SCORVO FILHO, J. D.; TURCO, P. H. N.; ALVES, J. M. C.; QUEIROZ, J. F. de; LOSEKANN, M. E. **Desempenho zootécnico da tilápia em tanques-rede em represa rural com diferentes concentrações de proteína bruta.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2018. 20 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 79).

FRIGHETTO, R. T. S.; QUEIROZ, J. F. de. Gestão de agroecossistemas e qualidade das águas. In: RODRIGUES, G. S.; BUSCHINELLI, C. C. de A.; RODRIGUES, I. A.; NEVES, M. C. M. **Avaliação de impactos ambientais para gestão da APA da Barra do Rio Mamanguape-PB.** Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2005. p. 88-110.

FUJIMOTO, R. Y.; CHAGAS, E. C.; ISHIKAWA, M. M.; BENAVIDES, M. V.; PEREIRA, A. M. L.; IWASHITA, M. K. P.; MACIEL, P. O.; BOIJINK, C. de L.; MAJOLO, C.; DIAS, M. T.; PEREIRA, S. L. A.; HIDE, D. M. V. **Procedimentos analíticos para avaliação de doenças de peixes.** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015a. 62 p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 204).

FUJIMOTO, R. Y.; HIDE, D. M. V.; PAIXÃO, P. E. G.; ABE, H. A.; DIAS, J. A. R.; SOUSA, N. C.; COUTO, M. V. S.; SILVA, R. V. B.; MADI, R. R.; BENAVIDES, M. V.; ISHIKAWA, M. M.; CHAGAS, E. C.; BOIJINK, C. de L.; DOMPIERI, M. H. G.; PEREIRA, A. M. L.; MACIEL, P. O. Fauna parasitária e relação parasito-hospedeiro de tambaquis criados na região do Baixo São Francisco, nordeste do Brasil. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 71, n. 2, p. 563-570, 2019.

FUJIMOTO, R. Y.; ISHIKAWA, M. M.; IWASHITA, M. K. P.; MACIEL, P. O.; BENAVIDES, M. V.; HIDE, D. M. V.; SILVA, R. V. B.; SANTOS, B. de J.; PAIXAO, P. E. G.; CORREA JUNIOR, E. C.; CHAGAS, E. C.; DOMPIERI, M. H. G. **Doenças parasitárias e manejo profilático de tambaquis (*Colossoma macropomum*) na região do Baixo São Francisco.** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015b. 42 p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 195).

GLENCROSS, B. Understanding the nutritional and biological constraints of ingredients to optimize their application in aquaculture feeds. In: NATES, S. F. (ed.). **Aquafeed formulation.** San Diego, CA: Academic Press, 2016. p. 33-73.

GOMES, J. R. **Hidrolisado proteico de fígado de aves como aditivo em dietas para tilápia do Nilo**. 2020. 70 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Animal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

GONÇALVES, V. T.; SAMPAIO, F. G.; DALBÓ, G. A.; CARRA, M. L.; SANTANA, F. S. Avaliação hematológica da tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*) cultivadas em tanques rede no reservatório de Furnas/MG. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE AQUICULTURA E BIOLOGIA AQUÁTICA, 6., 2014, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Aquicultura e Biologia Aquática, 2014.

GONÇALVES, V. T.; SAMPAIO, F. G.; LOSEKANN, M. E.; HISANO, H.; ARRUDA, L. F.; BORGHESI, R.; OETTERER, M.; DALBÓ, G. A. Hematological changes in pacu (*Piaractus mesopotamicus*) in response to different levels of fish silage as fish feed. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE NUTRIÇÃO E SAÚDE DE PEIXES, 5., 2013, Botucatu. [Anais...] Botucatu: Unesp, 2013a.

GONÇALVES, V. T.; SAMPAIO, F. G.; THOMAZ, J. M.; SANTANA, F. S.; CARRA, M. L. Uso dos parâmetros hematológicos da tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*), cultivadas em tanques rede no Reservatório de Furnas/MG, como ferramenta no biomonitoramento. In: CONGRESSO NACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 13., 2013, Campinas. **Anais...** Campinas: Sindicato das Entidades Mantenedoras de Ensino Superior (Semesp), 2013b. 10 p.

GRISOLIA, C. K.; RIVERO, C. L. G.; STARLING, F. L. R. M.; SILVA, I. C. R. D.; BARBOSA, A. C.; DOREA, J. G. Profile of micronucleus frequencies and DNA damage in different species of fish in a eutrophic tropical lake. **Genetics and Molecular Biology**, v. 32, n. 1, p. 138-143, 2009.

HASHIMOTO, J. C.; PASCHOAL, J. A. R.; QUEIROZ, J. F. de; REYES, F. G. R. Considerations on the use of malachite green in aquaculture and analytical aspects of determining the residues in fish: a review. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, Binghamton, v. 20, n. 3, p. 273-294, 2011.

HASHIMOTO, J. C.; PASCHOAL, J. A. R.; QUEIROZ, S. C. do N. de; FERRACINI, V. L.; ASSALIN, M. R.; REYES, F. G. R. A simple method for the determination of malachite green and leucomalachite green residues in fish by a modified QuEChERS extraction and LC/MS/MS. **Journal of AOAC International**, v. 95, n. 3, p. 913-922, 2012.

HERMES, L. C. **Guia prático para a caracterização e priorização de comunidades quanto ao manejo sustentável dos recursos hídricos locais, com ênfase na dessalinização de água salobra**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2007. 64 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 60).

HISANO, H.; BARBOSA, P. T. L.; HAYD, L. de A.; MATTIOLI, C. C. Comparative study of growth, feed efficiency, and hematological profile of Nile tilapia fingerlings in biofloc technology and recirculating aquaculture system. **Tropical Animal Health and Production**, v. 53, n. 3, article 60, 2021a.

HISANO, H.; BARBOSA, P. T. L.; HAYD, L. de A.; MATTIOLI, C. C. Evaluation of Nile tilapia in monoculture and polyculture with giant freshwater prawn in biofloc technology system and in recirculation aquaculture system. **International Aquatic Research**, v. 11, n. 4, p. 335-346, 2019a.

HISANO, H.; BORGHESI, R. **Composição química e qualidade microbiológica de silagens ácidas de vísceras de surubim (*Pseudoplatystoma spp.*) preparadas com diferentes proporções de ácidos fórmico e cítrico**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2015. 29 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 72).

HISANO, H.; DELLA FLORA, M. A. L.; PILECCO, J. L.; MENDONCA, S. Apparent digestibility of nutrients, energy, and amino acid of nontoxic and detoxified physic nut cakes for Nile tilapia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 8, p. 849-853, 2015a.

HISANO, H.; NARVÁEZ-SOLARTE, W. V.; BARROS, M. M.; PEZZATO, L. E. Desempenho produtivo de alevinos de tilápia-do-nilo alimentados com levedura e derivados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 7, p. 1035-1042, jul. 2007.

HISANO, H.; PARISI, J.; CARDOSO, I. L.; FERRI, G. H.; FERREIRA, P. M. F. Dietary protein reduction for Nile tilapia fingerlings reared in biofloc technology. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 51, n. 2, p. 452-462, 2019b.

HISANO, H.; PILECCO, J. L.; LARA, J. A. F. de. Corn gluten meal in pacu *Piaractus mesopotamicus* diets: effects on growth, haematology, and meat quality. **Aquaculture International**, v. 24, n. 4, p. 1049-1060, 2016.

HISANO, H.; PINHEIRO, V. R.; LOSEKANN, M. E.; SILVA, M. S. G. M. e. Effect of feeding frequency on water quality, growth, and hematological parameters of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* reared using biofloc technology. **Journal of Applied Aquaculture**, v. 33, n. 2, 96-110. 2021b.

HISANO, H.; SANCHEZ, M. S. S.; NASCIMENTO, M. S. Citric acid as a feed additive in pacu *Piaractus mesopotamicus* (Holmberg, 1887) diets. **Journal of Applied Ichthyology**, v. 33, n. 3, p. 478-484, 2017a.

HISANO, H.; SOARES, M. P.; LUIGGI, F. G.; ARENA, A. C. Dietary  $\beta$ -glucans and mannanoligosaccharides improve growth performance and intestinal morphology of juvenile pacu *Piaractus mesopotamicus* (Holmberg, 1887). **Aquaculture International**, v. 26, n. 1, p. 213-223, 2017b.

HOOFTMAN, R. N.; RAAT, W. K. Induction of nuclear abnormalities (micronuclei) in the peripheral blood erythrocytes of the eastern mudminnow *Umbra pygmaea* by ethyl methanesulphonate. **Mutation Research**, v. 104, n. 1-3, p. 147-152, 1982.

HOMKLIN, S.; ONG, S. K.; LIMPIYAKOM, T. Biotransformation of 17[ $\alpha$ ]-methyltestosterone in sediment under different electron acceptor conditions. **Chemosphere**, v. 82, n. 10, p. 1401-1407, 2011.

ISHIKAWA, M. M.; FERRI, G. H.; DIAS, D. V.; DONETTI, L.A.R.; QUEIROZ, J. F. **Boas práticas de manejo para melhoria do treinamento alimentar de tuviras *Gymnotus sp.*** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2017a. 15 p. (Embrapa Meio Ambiente. Circular Técnica, 27).

ISHIKAWA, M. M.; FERRI, G. H.; SOUZA, B. H.; DIAS, D. V.; DONETTI, L.A.R.; QUEIROZ, J. F. **Avaliação da sanidade de tuviras mantidas em um estabelecimento comercial: recomendações práticas para prevenção de doenças.** Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2017b. 14 p. (Embrapa Meio Ambiente. Circular Técnica, 28).

ISHIKAWA, M. M.; QUEIROZ, J. F. de; NASCIMENTO, J. L. do; PÁDUA, S. B. de; MARTINS, M. L. **Uso de biomarcadores em peixe e boas práticas de manejo sanitário para a piscicultura.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2020. 28 p. il. color. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 126).

ISHIKAWA, M. M.; SILVA, M. S. G. M. e; PÁDUA, S. B. de; OLIVEIRA, J. A.; DIAS, D. V. L.; SOUZA, B. H. **Procedimentos básicos para monitoramento da parasitofauna de peixes**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016. 5 p. il. (Embrapa Meio Ambiente. Circular Técnica, 24).

JERÔNIMO, G. T.; BRUM, A.; PÁDUA, S. B. de; GONÇALVES, E. L. T.; CAPECCI, R. S.; ISHIKAWA, M. M.; MARTINS, M. L. Haematological parameters of the hybrid surubim (*Pseudoplatystoma reticulatum* x *P. corruscans*) farmed in Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 58, n. 2, p. 254-261, 2014a.

JERÔNIMO, G. T.; FRANCESCHINI, L.; ZAGO, A. C.; SILVA, R. J. da; PÁDUA, S. B. de; VENTURA, A. S.; ISHIKAWA, M. M.; TAVARES-DIAS, M.; MARTINS, M. L. Parasitos de peixes Characiformes e seus híbridos cultivados no Brasil. In: TAVARES-DIAS, M.; MARIANO, W. dos S. (org.). **Aquicultura no Brasil: novas perspectivas**. São Carlos: Pedro & João Editores, 2015. v. I, cap. 15, p. 283-304.

JERÔNIMO, G. T.; PÁDUA, S. B. de; BAMPI, D.; GONÇALVES, E. L. T.; GARCIA, P.; ISHIKAWA, M. M.; MARTINS, M. L. Haematological and histopathological analysis in South American fish *Piaractus mesopotamicus* parasitized by monogenean (Dactylogyridae). **Brazilian Journal of Biology**, v. 74, n. 4, p. 1000-1006, 2014b.

JERÔNIMO, G. T.; PÁDUA, S. B.; VENTURA, A. S.; GONÇALVES, E. L. T.; ISHIKAWA, M. M.; MARTINS, M. L. Parasitological assessment in the hybrid surubim (*Pseudoplatystoma reticulatum* x *P. corruscans*), with uncommon occurrence of Monogenea parasites. **Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária**, v. 25, n. 2, p. 179-186, 2016.

JERÔNIMO, G. T.; VENTURA, A. S.; PÁDUA, S. B. de; FERREIRA, L. C.; ISHIKAWA, M. M.; MARTINS, M. L. Parasitological assessment in hybrids Serrasalminidae fish farmed in Brazil. **Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária**, v. 29, n. 4, e012920, 2020.

JESUS, T. B.; DE CARVALHO, C. E. V. Utilização de biomarcadores em peixes como ferramenta para avaliação de contaminação ambiental por mercúrio (Hg). **Oecologia Brasiliensis**, v. 12, n. 4, p. 680-693, 2008.

JONSSON, C. M.; ARANA, S.; FERRACINI, V. L.; QUEIROZ, S. C. do N. de; CLEMENTE, Z.; VALLIM, J. H.; MAIA, A. de H. N.; MOURA, M. A. M. de. Herbicide mixtures from usual practice in sugarcane crop: evaluation of oxidative stress and histopathological effects in the tropical fish *Oreochromis niloticus*. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 228, n. 11, article 332, 2017.

JONSSON, C. M.; AOYAMA, H. Alteração da atividade enzimática em organismos aquáticos por poluentes de origem agrícola: uma abordagem geral e sobre a suscetibilidade da fosfatase ácida. **Química Nova**, v. 33, n. 4, p. 920-928, 2010.

JONSSON, C. M.; AOYAMA, H. In vitro effect of agriculture pollutants and their joint action on *Pseudokirchneriella subcapitata* acid phosphatase. **Chemosphere**, v. 69, n. 6, p. 849-855, 2007.

JONSSON, C. M.; FERRACINI, V. L.; PARAIBA, L. C.; RANGEL, M.; AGUIAR, S. R. Alterações bioquímicas e acúmulo em pacus (*Metynnis argenteus*) expostos ao paclobutrazol. **Scientia Agricola**, v. 59, n.3, p. 441-446, 2002.

KARA, A. K.; FAKIOGLU, O.; KOTAN, R.; ATAMANALP, M.; ALAK, G. The investigation of bioremediation potential of *Bacillus subtilis* and *B. thuringiensis* isolates under controlled conditions in freshwater. **Archives of Microbiology**, v. 203, n. 5, p. 2075-2085, 2021.

- KIMPARA, J. M.; MORAES-VALENTI, P.; QUEIROZ, J. F. de; NEW, M. B. Effects of intensification of the Amazon River Prawn, *Macrobrachium amazonicum*, grow-out on effluent quality. **Journal of the World Aquaculture Society**, v. 44, n. 2, p. 210-219, 2013.
- KITAMURA, P. C.; LOPES, R. B.; CASTRO, F. G.; QUEIROZ, J. F. de. Avaliação ambiental e econômica dos lagos de pesca esportiva na Bacia do Rio Piracicaba. **Boletim de Indústria Animal**, v. 56, n. 1, p. 95-107, 1999.
- KITAMURA, P. C.; QUEIROZ, J. F. de; LOPES, R. B.; CASTRO, F. G.; BOYD, C. E. Environmental and economic assessment of fee-fishing in São Paulo state, Brazil. **Journal of Applied Aquaculture**, v. 12, n. 4, p. 23-41, 2002.
- LEÃO, J. A. D.; STECH, J. L.; CURTARELLI, M. P.; ARAÚJO, C. A. S.; OGASHAWARA, I.; SAMPAIO, F. G.; LORENZZETTI, J. A. Uso de imagens OLI/Landsat-8 e plataformas de coleta de dados limnológicos no monitoramento ambiental da piscicultura em tanque-rede no reservatório de Furnas-MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015.
- LINS, J. A. P. N.; KIRSCHNIK, P. G.; QUEIROZ, V. da S; CIRIO, S. M. Uso de peixes como biomarcadores para monitoramento ambiental aquático. **Revista Acadêmica: Ciência Animal**, v. 8, n. 4, p. 469-484, 2010.
- LOPES, R. B.; OLINDA, R. A.; SOUZA, B. A. I.; CYRINO, J. E. P.; DIAS, C. T. S.; QUEIROZ, J. F. de; TAVARES, L. H. S. Efficiency of bioaugmentation in the removal of organic matter in aquaculture systems. **Brazilian Journal of Biology**, v. 71, n. 2, p. 409-419, 2011.
- LOSEKANN, M. E.; HISANO, H.; DOMINGOS, P. R. Diagnóstico preliminar da produção em tanques-rede da associação de produtores do município de Guapé, MG. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE AQUICULTURA E BIOLOGIA AQUÁTICA, 6., 2014, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Aquicultura e Biologia Aquática, 2014.
- LORENZZETTI, J. A.; ARAÚJO, C. A. S.; STECH, J. L. Um sistema de coleta automática de dados ambientais para corpos hídricos em apoio à aquicultura. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 2014, São Carlos, SP. **Anais do SIAGRO: ciência, inovação e mercado 2014**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2014.
- LORENZZETTI, J. A.; COUTINHO, L. S. **Assessing space/time variability of inland waters surface temperature using remote sensing and in situ data**. 2015. Trabalho apresentado ao Aquatic Sciences Meeting of the Association for the Sciences of Limnology and Oceanography (ASLO), held at Granda, Spain, 22-27 February 2015.
- LÜCKSTÄDT, C. **Acidifiers in animal nutrition**. [S.l.]: Nottingham University, 2008.
- LUIS, A. I. S.; CAMPOS, E. V. R.; OLIVEIRA, J. L. de; GUILGER-CASAGRANDE, M.; LIMA, R. de; CASTANHA, R. F.; CASTRO, V. L. S. S. de; FRACETO, L. F. Zein nanoparticles impregnated with eugenol and garlic essential oils for treating fish pathogens. **ACS Omega**, v. 5, n. 25, p. 15557-15566, 2020.
- LUIS, A. I. S.; CAMPOS, E. V. R.; OLIVEIRA, J. L. de; VALLIM, J. H.; PROENÇA, P. L. de F.; CASTANHA, R. F.; CASTRO, V. L. S. S. de; FRACETO, L. F. Ecotoxicity evaluation of polymeric nanoparticles loaded with ascorbic acid for fish nutrition in aquaculture. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 19, n. 1, article 163, 2021.

- MADI, R. R.; UETA, M. T. O papel de Ancyrocephalinae (Monogenea: Dactylogyridae), parasito de *Geophagus brasiliensis* (Pisces: Cichlidae), como indicador ambiental. **Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária**, v. 18, n. 2, p. 38-41, 2009.
- MADI, R. R.; UETA, M. T. Parasitas de peixe como indicadores ambientais. In: SILVA-SOUZA, A. T.; LIZAMA, M. de los A. P.; TAKEMOTO, R. M. **Patologia e sanidade de organismos aquáticos**. Maringá: Massoni, 2012. p. 33-58.
- NUNES, K. S. D.; ASSALIN, M. R.; VALLIM, J. H.; JONSSON, C. M.; QUEIROZ, S. C. do N. de; REYES, F. G. R. Multiresidue method for quantification of sulfonamides and trimethoprim in tilapia fillet by liquid chromatography coupled to quadrupole time-of-flight mass spectrometry using QuEChERS for sample preparation. **Journal of Analytical Methods in Chemistry**, v. 2018, article 4506754, 2018a.
- NUNES, K. S. D.; VALLIM, J. H.; ASSALIN, M. R.; QUEIROZ, S. C. do N. de; PARAIBA, L. C.; JONSSON, C. M.; REYES, F. G. R. Depletion study, withdrawal period calculation and bioaccumulation of sulfamethazine in tilapia (*Oreochromis niloticus*) treated with medicated feed. **Chemosphere**, v. 197, p. 89-85, 2018b. 2018b.
- OLIVEIRA FILHO, E. C.; MUNIZ, DAPHNE H. F.; FREIRE, I. S.; RAMOS, F. R.; ALVES, R. T.; JONSSON, C. M.; GRISOLIA, C. K.; MONNERAT, R. G. Susceptibility of non-target invertebrates to Brazilian microbial pest control agents. **Ecotoxicology**, v. 20, n. 6, p. 1354-1360, 2011.
- ORLANDO, E. A.; ROQUE, A. G. C.; LOSEKANN, M. E.; SIMIONATO, A. V. C. UPLC-MS/MS determination of florfenicol and florfenicol amine antimicrobial residues in tilapia muscle. **Journal of Chromatography B**, v. 1035, p. 8-15, 2016.
- PÁDUA, S. B. de; JERÔNIMO, G. T.; ISHIKAWA, M. M.; BELO, M. A. de A.; MARTINS, M. L.; PELISARI, T.; KASAI, R. Y. D.; CARRIJO-MAUAD, J. R. Parasitological assessment and host-parasite relationship in farmed Cachara catfish fingerlings (*Pseudoplatystoma reticulatum* Eigenmann & Eigenmann 1889), Mato Grosso do Sul, Brazil. **Neotropical Helminthology**, v. 8, n. 1, p. 37-45, 2014a.
- PÁDUA, S. B. de; MARQUES, D. P.; SEBASTIÃO, F. A.; PILARSKI, F.; MARTINS, M. L.; ISHIKAWA, M. M. Isolation, characterization and pathology of *Citrobacter freundii* infection in native brazilian catfish *Pseudoplatystoma*. **Brazilian Journal of Veterinary Pathology**, v. 7, n. 3, p. 151-157, 2014b.
- PÁDUA, S. B. de; MARTINS, M. L.; VALLADÃO, G. M. R.; UTZ, L.; ZARA, F. J.; ISHIKAWA, M. M.; ANDRADE BELO, M. A. de. Host-parasite relationship during *Epistylis* sp. (Ciliophora: Epistylididae) infestation in farmed cichlid and pimelodid fish. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 5, p. 520-526, maio 2016.
- PÁDUA, S. B.; MENEZES-FILHO, R. N.; MARTINS, M. L.; BELO, M. A. A.; ISHIKAWA, M. M.; NASCIMENTO, C. A.; SATURNINO, K. C.; CARRIJO-MAUAD, J. R. A survey of epitheliocystis disease in farmed Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* Linnaeus, 1758) in Brazil. **Journal of Applied Ichthyology**, v. 31, n. 5, p. 927-930, 2015.
- PASETO, L. A.; PATINO, M. T. O.; ALCANTARA, M. R. Analysis of creating value in aquaculture enterprises through economic social and environmental indicators. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 47, p. 4840-4845, 2016.

PEREIRA, S. L. A.; CHAGAS, E. C.; MACIEL, P. O.; BENAVIDES, M. V.; MAJOLO, C.; BOIJINK, C. de L.; TAVARES-DIAS, M.; ISHIKAWA, M. M.; FUJIMOTO, R. Y.; BRANDÃO, F. R.; SOUSA, K. L. de; MORAIS, M. da S.; MARTINS, V. F. da S. **Agentes patogênicos de tabaquis cultivados, com destaque para registros em Rio Preto da Eva, AM.** Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2016. 80 p. (Embrapa Amazônia Ocidental. Documentos, 127).

PESSOA, M. C. P. Y.; FRASCA-SCORVO, C. M. D.; LOSEKANN, M. E.; HISANO, H.; SCORVO FILHO, J. D.; SILVA, C. A. da; SILVA, M. S. G. M. e; SAMPAIO, F. G.; INOUE, L. A. K. A.; BERGAMIN, G. T.; QUEIROZ, J. F. de; PAZZIANOTTO, C. B. **Aquisys v. 1.3- validated version of the computer system to support best management practices (BPM) and environmental management for aquaculture in Brazil.** In: FENACAM & LACQUA/SARA (WAS)'15, 2015, Fortaleza. **Science & Industry joining forces to meet seafood demands: abstracts...** Fortaleza: ABCC; World Aquaculture Society, 2015. p. 210. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/139446/1/PC3A1ginas2ode2oabstract20210-20Aquisys-fenacam-20153.pdf>. Acesso em 14 jul. 2021.

PESSOA, M. C. P. Y.; FRASCÁ-SCORVO, C. M. D.; LOSEKANN, M. E.; SILVA, M. S. G. M. e; SILVA, C. A. da; HISANO, H.; SCORVO FILHO, J. D.; INOUE, L. A. K. A. **Incentivo à inclusão digital de produtores de tilápia pelo uso do sistema informatizado Aquisys v.1.3.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AQUICULTURA E BIOLOGIA AQUÁTICA, 8., 2018, Natal. **Um olhar para a inovação: resumos.** Londrina: Sociedade Brasileira de Aquicultura e Biologia Aquática, 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/190072/1/RA-PessoaMCPY-et-al-Aquaciencia2018-Incentivo....pdf>. Acesso em: 21 jul. 2021.

PESSOA, M. C. P. Y.; FRASCÁ-SCORVO, C. M. D.; LOSEKANN, M. E.; SILVA, M. S. G. M. e; SILVA, C. A. da; HISANO, H.; SCORVO FILHO, J. D.; INOUE, L. A. K. A. **Método para promover a inclusão digital de produtores de tilápia pelo uso do Aquisys v.1.3.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016. 52 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 104). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/146451/1/2016DC03.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2021.

PESSOA, M. C. P. Y.; LOSEKANN, M. E. **AQUISYS versão 1.3: sistema informatizado de apoio às boas práticas de manejo e gestão ambiental na aquicultura.** Dia de Campo na TV. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016a. Programa de TV. Disponível em: <https://youtu.be/utznxkrTOiY>. Acesso: 21 jul. 2021.

PESSOA, M. C. P. Y.; LOSEKANN, M. E. **AQUISYS v. 1.3: sistema informatizado para manejo e gestão ambiental da aquicultura: programa 13: Centro-Oeste/Sudeste.** In: PROGRAMA Prosa Rural: Centro-Oeste/Sudeste: abril. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016b. 1 CD-ROM. Programa de rádio. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/142337/1/10-PGM-13-CENTRO-OESTE.mp3>. Acesso: 21 jul. 2021.

PESSOA, M. C. P. Y.; LOSEKANN, M. E.; FRASCÁ-SCORVO, C. M. D.; HISANO, H.; SCORVO FILHO, J. D.; SILVA, C. A. da; BERGAMIN, G. T.; SAMPAIO, F. G.; SILVA, M. S. G. M. e **Aquisys 1.2: sistema informatizado de apoio às boas práticas de manejo (BPM) e gestão ambiental da aquicultura.** In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE AQUICULTURA E BIOLOGIA AQUÁTICA, 6., 2014, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Aquicultura e Biologia Aquática, 2014. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/115104/1/2014RA-017.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2021.

PESSOA, M. C. P. Y.; SEIXAS, A. F. R.; LOSEKANN, M. E.; QUEIROZ, J. F. de; SILVA, M. S. G. M. e. Sistema computacional para apoyar las buenas prácticas de gestión de la acuicultura en Brasil (AQUISYS) - énfasis en la tilapicultura. In: CONGRESO NACIONAL DE ACUICULTURA, 12., 2009, Madrid. **Con la acuicultura alimentamos tu salud: libro de resúmenes**. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009. p. 714-715. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/61584/1/2009AA003.pdf>. Acesso: 14 jul. 2021.

PESSOA, M. C. P. Y.; SEIXAS, A. F. R.; LOSEKANN, M. E.; QUEIROZ, J. F. de; SILVA, M. S. G. M. e; PAZZIANOTTO, C. Aquisys – a computer system to support good practices of management for Brazilian tilapiculture. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL MODELLING AND SOFTWARE, 2010, Ottawa. **Modelling for environment's sake: proceedings - conference edition**. Ottawa: IEMSS, 2010. 8 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/61582/1/2010AA001.pdf>. Acesso: 21 jul. 2021.

PESSOA, M. C. P. Y.; SEIXAS, A. F. R.; LOSEKANN, M. E.; SILVA, M. S. G. M. e; PAZZIANOTTO, C. B.; INOUE, L. A. K. A.; QUEIROZ, J. F. de. A web-system to evaluate the use of best management practices on tilapia culture in Brazil. **WORD AQUACULTURE 2011 - AQUACULTURE FOR A CHANGING WORLD, 2011**, Natal. Conference abstracts... Natal: World Aquaculture Society, 2011. p. 1181. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/61644/1/2011RA096.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2021.

POOPATHI, S.; THIRUGNANASAMBANTHAM, K.; MANI, C.; LAKSHMI, P.V.; RAGUL, K. Purification and characterization of keratinase from feather degrading bacterium useful for mosquito control. a new report. **Tropical Biomedicine**, v. 31, n. 1, p. 97-109, 2014.

PORTINHO, J. L.; SILVA, M. S. G. M. e; QUEIROZ, J. F. de; BARROS, I. de; GOMES, A. C. C.; RUOCCO, A. M. C.; LOSEKANN, M. E.; KOGA-VICENTE, A.; ARAUJO, L. S. de; VICENTE, L. E.; RODRIGUES, G. S. **Indicadores para avaliação de boas práticas de manejo na produção de tilápia em tanques-rede**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2021. 46 p. il. color. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 92).

QUEIROZ, J. F. de. **Boas práticas de manejo (BPM) para a aquicultura em viveiros escavados e em reservatórios**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016. 8 p. il. color. (Embrapa Meio Ambiente. Circular Técnica, 25).

QUEIROZ, J. F. de; ALVES, J. M. C.; LOSEKANN, M. E.; FRASCA-SCORVO, C. M. D.; SCORVO FILHO, J. D.; FERRI, G. H.; ISHIKAWA, M. M. **Manejo alimentar e da qualidade da água na produção de tilápia-do-nilo (*Oreochromis niloticus*)**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2021b. 36 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 130).

QUEIROZ, J. F. de; BOEIRA, R. C. **Boas práticas de manejo (BPMs) para reduzir o acúmulo de amônia nos viveiros de aquicultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2007. 5 p. (Embrapa Meio Ambiente. Comunicado Técnico, 44).

QUEIROZ, J. F. de; BOEIRA, R. C. **Boas práticas de manejo para manter concentrações adequadas de oxigênio dissolvido em viveiros de piscicultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016. 9 p. (Embrapa Meio Ambiente. Comunicado Técnico, 54).

QUEIROZ, J. F. de; BOEIRA, R. C. **Calagem e controle da acidez dos viveiros de aquicultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006a. 8 p. (Embrapa Meio Ambiente. Circular Técnica, 14).

QUEIROZ, J. F. de; BOEIRA, R. C. **Determinação do percentual de troca de água em função do acúmulo de amônia (NH<sub>3</sub>) nos viveiros de piscicultura.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2008. 4 p. (Embrapa Meio Ambiente. Comunicado Técnico, 47).

QUEIROZ, J. F. de; BOEIRA, R. C. **Recomendações práticas para o manejo de sedimentos do fundo dos viveiros de aquíicultura.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006b. 6 p. (Embrapa Meio Ambiente. Comunicado Técnico, 37).

QUEIROZ, J. F. de; BOEIRA, R. C.; NICOLELLA, G. **Efeitos da aplicação de grandes quantidades de calcário agrícola em viveiros de piscicultura.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016. 26 p. il. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 69).

QUEIROZ, J. F. de; BOEIRA, R. C.; SILVA, M. S. G. M. e. Amostragem de sedimentos do fundo de lagos, represas e viveiros de aquíicultura para análise físico-químicas. In: FILIZOLA, H. F.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. de. (ed.). **Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental: solo, água e sedimentos.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006a. p. 137-151.

QUEIROZ, J. F. de; BOEIRA, R. C.; SILVEIRA, M. P. **Coleta e preparação de amostras de sedimentos em viveiros de aquíicultura.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004a. 5 p. (Embrapa Meio Ambiente. 2006a Comunicado Técnico, 17).

QUEIROZ, J. F. de; BOEIRA, R. C.; SILVEIRA, M. P. Coleta e preparo de amostras de sedimentos do fundo de viveiros de aquíicultura. In: CONGRESO VIRTUAL IBEROAMERICANO SOBRE GESTIÓN DE CALIDAD EN LABORATORIOS, 2., 2003, Valladolid. **Resúmenes...** Valladolid: ITACYL, 2004b. v. I, p. 533-541.

QUEIROZ, J. F. de; BOEIRA, R. C.; SILVEIRA, M. P. **Coletor simplificado de sedimentos do fundo de viveiros de aquíicultura.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004c. 5 p. (Embrapa Meio Ambiente. Comunicado Técnico, 16).

QUEIROZ, J. F. de; BOYD, C. E. **Effects of a bacterial inoculum in channel catfish ponds.** Journal of the World Aquaculture Society, v. 29, n. 1, p. 67-73, 1998.

QUEIROZ, J. F. de; BOYD, C. E.; GROSS, A. Evaluation of a bio-organic catalyst in channel catfish, *Ictalurus punctatus*, ponds. **Journal of Applied Aquaculture**, v. 8, n. 2, p. 49-61, 1998.

QUEIROZ, J. F. de; CYRINO, J. E. P.; SCORVO FILHO, J. D. **Memórias do I Workshop Internacional para o Desenvolvimento de Boas Práticas de Manejo (BPMs) para a Aquíicultura.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2007a. 24 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 70).

QUEIROZ, J. F. de; FRASCA-SCORVO, C. M. D.; SCORVO FILHO, J. D.; TURCO, P. H. N.; LOSEKANN, M. E.; ISHIKAWA, M. M.; ALVES, J. M. C. **Recomendações práticas para avaliação da qualidade da água na produção de tilápia em tanques-redes.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2021a. 22 p. il. color. (Embrapa Meio Ambiente. Circular técnica, 31).

QUEIROZ, J. F. de; FREATO, T. A.; LUIZ, A. J. B.; ISHIKAWA, M. M.; FRIGHETTO, R. T. S. **Boas práticas de manejo para sistemas de aquaponia.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2017. 29 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 113).

QUEIROZ, J. F. de; FRIGHETTO, R. T. S. Aquíicultura e meio ambiente: qualidade de água e boas práticas de manejo (BPMs). In: RODRIGUES, G. S.; BUSCHINELLI, C. C. de A.; RODRIGUES, I. A.; NEVES, M. C.

M. **Avaliação de impactos ambientais para gestão da APA da Barra do Rio Mamanguape-PB.** Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2005. p. 74-87.

QUEIROZ, J. F. de; KITAMURA, P. C. Sustentabilidade ambiental: avaliação ambiental dos sedimentos do fundo dos viveiros e dos canais de abastecimento e drenagem. In: RODRIGUES, J. (org.). **Plataforma tecnológica do camarão marinho cultivado.** Brasília, DF: DPA, MAPA, 2001. p. 103-142.

QUEIROZ, J. F. de; LOURENCO, J. N. de P.; KITAMURA, P. C. (ed.). **A Embrapa e a aqüicultura: demandas e prioridades de pesquisa.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica: Embrapa-Secretaria de Administração Estratégica, 2002. 35 p. (Embrapa-Secretaria de Administração Estratégica. Texto para discussão, II).

QUEIROZ, J. F. de; LOURENÇO, J. N. P.; KITAMURA, P. C.; SCORVO FILHO, J. D.; CYRINO, J. E. P.; CASTAGNOLLI, N.; VALENTI, W. C.; BERNARDINO, G. Aquaculture in Brazil: research priorities and potential for further international collaboration. **World Aquaculture**, v. 36, n. 1, p. 45-50, 2005a.

QUEIROZ, J. F. de; MACHADO, T. A.; RODRIGUES, G. S.; RODRIGUES, I. A. **Indicadores para a avaliação ambiental em pesque-pagues nas dimensões ecologia da paisagem e qualidade da água.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006b. 39 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 41).

QUEIROZ, J. F. de; NICOLELLA, G.; BOEIRA, R. C. **Avaliação de diferentes métodos de calagem para correção da acidez dos sedimentos do fundo de viveiros de aqüicultura.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2007b. 6 p. (Embrapa Meio Ambiente. Circular Técnica, 15).

QUEIROZ, J. F. de; NICOLELLA, G.; WOOD, C. W.; BOYD, C. E. Lime application methods, water and bottom soil acidity in fresh water fish ponds. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 6, n. 5, p. 469-475, 2004d.

QUEIROZ, J. F. de; ORTEGA, E.; FERRAZ, J.M. G.; BOYD, C. E. Análise Emergética da Produção de Bagre do Canal (*Ictalurus punctatus*). **Brazilian Journal of Ecology**, Rio Claro - SP, v. 4, n.1-2, p. 61-70, 2000.

QUEIROZ, J. F. de; ROTTA, M. A. **Boas práticas de manejo para piscicultura em tanques-rede.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016. 10 p. (Embrapa Meio Ambiente. Circular Técnica, 26).

QUEIROZ, J. F. de; SILVEIRA, M. P. **Recomendações práticas para melhorar a qualidade da água e dos efluentes dos viveiros de aqüicultura.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 14 p. il. (Embrapa Meio Ambiente. Circular Técnica, 12).

REDDY, J. S. Probiotics in aquaculture: Importance, influence and future perspectives. **International Journal of Bioassays**, v. 4, n. 3, p. 3710-3718, 2015.

RESENDE, E. K. de; QUEIROZ, J. F. de. **Bases tecnológicas para o desenvolvimento sustentável da aqüicultura no Brasil: relatório final.** Corumbá: Embrapa Pantanal, 2012. Disponível em: [docplayer.com.br/21175429-Bases-tecnologicas-para-o-desenvolvimento-sustentavel-da-aquicultura-no-brasil-aquabrazil-relatorio-final.html](http://docplayer.com.br/21175429-Bases-tecnologicas-para-o-desenvolvimento-sustentavel-da-aquicultura-no-brasil-aquabrazil-relatorio-final.html). Acesso em: 22 jul. 2021.

RIVERO, C.; BARBOSA, A.; FERREIRA, M.; DOREA, J.; GRISOLIA, C. K. Evaluation of genotoxicity and effects on reproduction of nonylphenol in *Oreochromis niloticus* (Pisces: cichlidae). **Ecotoxicologia**, v. 17, n. 8, p. 732-737, 2008.

RIVERO-WENDT, C. L. G.; MIRANDA-VILELA, A. L.; FERREIRA, M. F. N.; BORGES, A. M.; GRISOLIA, C. K. Cytogenetic toxicity and gonadal effects of 17  $\alpha$ -methyltestosterone in *Astyanax bimaculatus* (Characidae) and *Oreochromis niloticus* (Cichlidae). *Genetics and Molecular Research*, v. 12, n. 3, p. 3862-3870, 2013.

RODRIGUES, G. S.; ANTUNES, L. R. Avaliação de Impactos Ambientais para Gestão da APA da Barra do Rio Mamanguape (PB) In: RODRIGUES, G. S.; BUSCHINELLI, C. C. de A.; RODRIGUES, I. A.; NEVES, M. C. M. **Avaliação de impactos ambientais para gestão da APA da Barra do Rio Mamanguape-PB**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2005. p. 1-10.

RODRIGUES, G. S.; BUSCHINELLI, C. C. de A.; RODRIGUES, I. A.; NEVES, M. C. M. **Avaliação de impactos ambientais para gestão da APA da Barra do Rio Mamanguape-PB**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2005. 214 p. 1 CD-ROM.

RODRIGUES, G. S.; CAMPANHOLA, C. Sistema integrado de avaliação de impacto ambiental aplicado a atividade do Novo Rural. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 38, n.4, p. 445-451, 2003.

RODRIGUES, G. S.; CAMPANHOLA, C.; VALARINI, P. J.; QUEIROZ, J. F. de; FRIGHETTO, R. T. S.; RAMOS FILHO, L. O.; RODRIGUES, I.; BROMBAL, J. C.; TOLEDO, L. G. de. **Avaliação de impacto ambiental de atividades em estabelecimentos familiares do novo rural**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2003. 46 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 17).

RODRIGUES, G. S.; QUEIROZ, J. F. de; FRIGHETTO, R. T. S.; SAMPAIO, F. G.; FRASCA-SCORVO, C. M. D.; COUTO, K. R.; RODRIGUES, I. A. Best management practices and environmental management in aquaculture: indicators for monitoring in multiple scales. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 4., 2013, São Paulo. **Integrating cleaner production into sustainability strategies: anais...** São Paulo: UNIP, 2013. 9 p.

RODRIGUES, G. S.; RODRIGUES, I. A.; BUSCHINELLI, C. C. A.; BARROS, I. Integrated farm sustainability assessment for the environmental management of rural activities. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 30, n. 4, p. 229-239, 2010.

RODRIGUES, G. S.; RODRIGUES, I. A.; BUSCHINELLI, C. C. de A.; QUEIROZ, J. F. de; FRIGHETTO, R. T. S.; ANTUNES, L. R.; NEVES, M. C. M.; FREITAS, G. L.; RODOVALHO, R. B. **Gestão ambiental territorial na Área de Proteção Ambiental da Barra do Rio Mamanguape (PB)**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2008. 91 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 50).

RODRIGUES, A. C. F.; OLIVEIRA MONERÓ, T. de; FRIGHETTO, R. T. S.; DE ALMEIDA, E. A. E2 potentializes benzo(a)pyrene-induced hepatic cytochrome P450 enzyme activities in Nile tilapia at high concentrations. *Environmental Science and Pollution Research International*, v. 22, p. 17367-17374, 2014.

ROTTA, M. A.; QUEIROZ, J. F. de. **Boas práticas de manejo (BPMs) para a produção de peixes em tanques-redes**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2003. 27 p. (Embrapa Pantanal. Documentos, 47).

ROTTA, M. A.; QUEIROZ, J. F. de; SANTOS, R. A. C. P. Piscicultura: tanques-rede. In: MARQUES, D. K. S.; MORAES, A. S. (ed.). **Pesca e piscicultura no Pantanal: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Corumbá: Embrapa Pantanal, 2010a. p. 109-115 (Coleção 500 perguntas 500 respostas).

ROTTA, M. A.; QUEIROZ, J. F. de; SANTOS, R. A. C. P.; NASCIMENTO, F. L. Piscicultura: sistemas de cultivo e manejo. In: MARQUES, D. K. S.; MORAES, A. S. (ed.). **Pesca e piscicultura no Pantanal: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Corumbá: Embrapa Pantanal, 2010b. p. 71-97. (Coleção 500 perguntas 500 respostas).

SALGADO, M. P. G.; FORMAGGIO, A. R.; NEVES, M. C.; LUIZ, A. J. B. Análise das áreas de contribuição de parques aquícolas do reservatório de Furnas - MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais... Foz do Iguaçu**: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2013. p. 6830-6836.

SAMPAIO, F. G.; ARAUJO, C. A. S. de; DALLAGO, B. S. L.; STECH, J. L.; LORENZETTI, J. A.; ALCÂNTARA, E.; LOSEKANN, M. E.; MARIN, D. B.; LEÃO, J. A. D.; BUENO, G. W. Unveiling low-to-high-frequency data sampling caveats for aquaculture environmental monitoring and management. **Aquaculture Reports**, v. 20, article 100764, 2021.

SAMPAIO, F. G.; BUENO, G. W.; ARAUJO, C. A. S.; DALLAGO, B. S. L. LOSEKANN, M. E. STECH, J. L. Alta e baixa frequência no monitoramento ambiental de piscicultura no reservatório de Furnas (MG). In: SAMPAIO, F. G.; SILVA, C. M. da; TORIGOI, R. H.; MIGNANI, L.; PACKER, A. P. C.; MANZATTO, C. V.; SILVA, J. L. da (ed.). **Estratégias de monitoramento ambiental da aquicultura: portfólio de resultados do monitoramento ambiental da aquicultura em águas da União**. São Paulo: Instituto de Pesca: APTA, 2019a. p. 47-48.

SAMPAIO, F. G.; CARRA, M. L.; JONSSON, C. M.; GONÇALVES, V. T.; DAL'BÓ, G. A.; NUNES, K. S. D.; VALLIM, J. H.; DALLAGO, B. S. L.; QUEIROZ, S. C. do N. de; REYES, F. G. R. Effects of dietary exposure to sulfamethazine on the hematological parameters and hepatic oxidative stress biomarkers in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 97, n. 4, p. 528-535, 2016.

SAMPAIO, F. G.; LOSEKANN, M. E.; TIRONI, G. C.; MELO, M. V. O.; MARIN, D. B.; MATTOS, B. O.; CARVALHO, G. C.; DALLAGO, B. S. L.; TORIGOI, R. H. Monitoramento ambiental da piscicultura no reservatório de Furnas (MG). In: SAMPAIO, F. G.; SILVA, C. M. da; TORIGOI, R. H.; MIGNANI, L.; PACKER, A. P. C.; MANZATTO, C. V.; SILVA, J. L. da (ed.). **Estratégias de monitoramento ambiental da aquicultura: portfólio de resultados do monitoramento ambiental da aquicultura em águas da União**. São Paulo: Instituto de Pesca: APTA, 2019b. p. 45-46.

SAMPAIO, F. G.; SILVA, C. M.; CAMPOS, J. B.; SILVA, J. L.; TORIGOI, R. H.; BODENS, F. W. P.; PACKER, A. P. Monitoramento e gestão ambiental da aquicultura. In: SAMPAIO, F. G.; SILVA, C. M. da; MIGNANI, L.; PACKER, A. P.; MANZATTO, C. V. (ed.). **Monitoramento ambiental da Aquicultura em águas da União: subsídios para a proposição de um plano nacional**. Brasília, DF: Embrapa, 2019c. p. 8-25.

SAMPAIO, F. G.; SILVA, C. M. da; MIGNANI, L.; PACKER, A. P.; MANZATTO, C. V. (ed.). **Monitoramento ambiental da Aquicultura em águas da União: subsídios para a proposição de um plano nacional**. Brasília, DF: Embrapa, 2019d. 99 p.

SANCHEZ, M. S. dos S.; NASCIMENTO, M. dos S.; HISANO, H. Substituição do milho pelo sorgo em dietas para juvenis de pacu. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 1, p. 1-8, jan. 2016.

SANTANA, F. da S.; CARRA, M. L.; DAL'BÓ, G. A.; SAMPAIO, F. G.; LOSEKANN, M. E.; BORGHESI, R.; ARRUDA, L. F. de; OETTERER, M. Haematological responses of pacu *Piaractus mesopotamicus* fed diets with co-dried acid fish silage. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE NUTRIÇÃO E SAÚDE DE PEIXES, 5., 2013, Botucatu. [Anais...] Botucatu: Unesp, 2013.

SCHLENK, D. Necessity of defining biomarkers for use in ecological risk assessment. **Marine Pollution Bulletin**, v. 39, n. 1-2, p. 48-53, 1999.

SEIXAS, A. F. R.; PESSOA, M. C. P. Y.; LOSEKANN, M. E.; QUEIROZ, J. F. de; BOSSO, D. A. Sistema especialista como ferramenta de apoio às boas praticas de manejo da tilapicultura. **Revista Agrogeoambiental**, v. 1, n. 3, p. 130-134, dez. 2009. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/143998/1/2009AP-47.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2021.

SEIXAS, A. F. R.; PESSOA, M. C. P. Y.; LOSEKANN, M. E.; SILVA, M. S. G. M. e; QUEIROZ, J. F. de; INOUE, L. A. K. A. Informatização de indicadores para uso em praticas de manejo sustentável da aquicultura. IN: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 4., 2010, Campinas. **Anais...** Campinas: IAC: ITAL: APTA; Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2010. 1 CD-ROM. 6 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/61641/1/2010AA002.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2021.

SHIROMA, L. S.; BOTTOLI, C. B. G.; JONSSON, C. M.; QUEIROZ, S. C. do N. de. Exposure of tilapia (*Oreochromis niloticus*) to the antibiotic florfenicol in water: determination of the bioconcentration factor and the withdrawal period. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 29, p. 39026-39034, 2021.

SHIROMA, L. S.; QUEIROZ, S. C. do N. de; JONSSON, C. M.; BOTTOLI, C. B. G. Extraction strategies for simultaneous determination of florfenicol and florfenicol amine in tilapia (*Oreochromis niloticus*) muscle: quantification by LC-MS/MS. **Food Analytical Methods**, v. 13, n. 1, p. 291-302, 2020.

SILVA, C. M. da; SAMPAIO, F. G. Planos de monitoramento ambiental da aquicultura. In: SAMPAIO, F. G.; SILVA, C. M. da; MIGNANI, L.; PACKER, A. P.; MANZATTO, C. V. (ed.). **Monitoramento ambiental da Aquicultura em águas da União: subsídios para a proposição de um plano nacional**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. p. 57-79.

SILVA, D. C. G.; PACKER, A. P.; SAMPAIO, F. G.; RIBEIRINHO, V. S.; CAMARGO, C. C. F. de; MAXIMILIANO, V. C. B.; SANTOS, J. de O. Dinâmica de metais potencialmente tóxicos em sedimento da área de influência direta de piscicultura em tanques rede em reservatórios. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE AQUICULTURA E BIOLOGIA AQUÁTICA, 6., 2014, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Aquicultura e Biologia Aquática, 2014a.

SILVA, M. G. da; PACKER, A. P.; SAMPAIO, F. G.; MARANI, L.; MARIANO, E. V. C.; PAZIANOTTO, R. A. A.; FERREIRA, W. J.; ALVALÁ, P. C. Impact of intensive fish farming on methane emission in a tropical hydropower reservoir. **Climatic Change**, v. 150, n. 3, p. 195-210, 2018.

SILVA, M. S. G. M. e; CARVALHO, N. C.; LOSEKANN, M. E.; SAMPAIO, F. G.; MARIGO, A. L. S.; CARVALHO, M. P.; SONODA, K. C. Composição da comunidade macrobentônica no reservatório de Furnas (MG) em área de parque aquícola. In: SEMINÁRIO DA REDE AGROHIDRO, 2., 2014, Campinas. **Impactos da agricultura e das mudanças climáticas nos recursos hídricos: anais...** Brasília, DF: Embrapa, 2014b. p. 112-116.

SILVA, M. S. G. M. e; LOSEKANN, M. E.; HISANO, H. **Aquicultura: manejo e aproveitamento de efluentes**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2013. 39 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 95).

SILVA, M. S. G. M. e; ROSA, A. J. de M.; RUOCCO, A. M. C.; DIAS, E. S.; KOBAYASHI, J. T. **Metodologia de biomonitoramento aplicada a reservatórios com tanques-rede de piscicultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2021. 26 p. il. color. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 128).

SILVA, M. S. G. M. e; SAMPAIO, F. G.; LOSEKANN, M. E.; CARVALHO, N. C.; MARIGO, A. L. S.; NASCIMENTO, M. P. C. do. Avaliação dos macroinvertebrados bentônicos como bioindicadores da qualidade da água da aquicultura em tanques rede. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE AQUICULTURA E BIOLOGIA AQUÁTICA, 6., 2014, Foz do Iguaçu. **Anais... Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Aquicultura e Biologia Aquática**, 2014c.

SOARES, M. P.; CARDOSO, I. L.; ISHIKAWA, M. M.; OLIVEIRA, A. da S. S. de; SARTORATTO, A.; JONSSON, C. M.; QUEIROZ, S. C. do N. de; DUARTE, M. C. T.; RANTIN, F. T.; SAMPAIO, F. G. Effects of *Artemisia annua* alcohol extract on physiological and innate immunity of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to improve health status. **Fish and Shellfish Immunology**, v. 105, p. 369-377, 2020a.

SOARES, M. P.; PINHEIRO, V. R.; CARDOSO, I. L.; OLIVEIRA, A. da S. S. de; SARTORATTO, A.; ISHIKAWA, M. M.; JONSSON, C. M.; DUARTE, M. C. T.; RANTIN, F. T.; SAMPAIO, F. G. In vitro antibacterial activity of ethanol extract of *Artemisia annua* and its bioactive fractions against fish pathogens. **Aquaculture Research**, v. 52, n. 4, p. 1797-1801, 2020b.

SOARES, M. P.; OLIVEIRA, F. C.; CARDOSO, I. L.; URBINATI, E. C.; CAMPOS, C. M. de; HISANO, H. Glucan-MOS® improved growth and innate immunity in pacu stressed and experimentally infected with *Aeromonas hydrophila*. **Fish and Shellfish Immunology**, v. 73, p. 133-140, 2018.

TANG, Y.; LI, M., XU, D., HUANG, J.; SUN, J. Application potential of aerobic denitrifiers coupled with a biostimulant for nitrogen removal from urban river sediment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 6, p. 5980-5993, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0903-4>.

SOUZA, M. F. C. de; PENTEADO, A. L.; SOUZA, D. R. C. de; QUEIROZ, S. C. do N. de. Atividade antimicrobiana in vitro de óleos essenciais contra patógenos de peixes. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 10, p. 17911-17921, 2019.

TAVARES-DIAS, M.; ISHIKAWA, M. M.; MARTINS, M. L.; SATAKE, F.; HISANO, H.; PÁDUA, S. B. de; JERÔNIMO, G. T.; SÁ, A. R. S. de. Hematologia: ferramenta para o monitoramento do estado de saúde de peixes em cultivo. In: SARAN NETO, A.; MARIANO, W. dos S.; SÓRIA, S. F. P. (org.). **Tópicos especiais em saúde e criação animal**. São Carlos, SP: Pedro & João Editores, 2009. p. 43-80.

TURCO, P. H. N.; FRASCA-SCORVO, C. M. D.; DONADELLI, A.; SCORVO FILHO, J. D.; LOSEKANN, M. E. Análise do custo e rentabilidade da produção de tilápia em tanques rede em represa rural com diferentes manejos alimentares. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 51, Belém, PA, 2013. **Novas fronteiras da agropecuária no Brasil e na Amazônia: desafios da sustentabilidade: anais**. Belém, PA: SOBER, 2013. 7 p.

TURCO, P. H. N.; DONADELLI, A.; FRASCA-SCORVO, C. M. D.; SCORVO FILHO, J. D.; TARSITANO, M. A. A. Análise econômica da produção de tilápias em tanques-rede de pequeno volume: manejo de ração com diferentes teores de proteína bruta. **Informações Econômicas**, v. 44, n. 1, p. 5-11, 2014.

VALENTI, W. C.; BARROS, H. P.; MORAES-VALENTI, P.; BUENO, G. W.; CAVALLI, R. O. Aquaculture in Brazil: past, present and future. **Aquaculture Reports**, v. 19, article 10611, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100611>. Acesso em 02/08/2021.

VENTURA, A. S.; PÁDUA, S. B.; ISHIKAWA, M. M.; MARTINS, M. L.; TAKEMOTO, R. M.; JERÔNIMO, G. T. Endoparasites of *Gymnotus* sp. (Gymnotiformes: Gymnotidae) from commercial baitfish farming in Pantanal basin, Central Brazil. *Boletim do Instituto de Pesca*, São Paulo, v. 44, n. 3, e332, 2018a. 5 p.

VENTURA, A. S.; JERÔNIMO, G. T.; FERRI, G. H.; PÁDUA, S. B.; MARTINS, M. L.; ISHIKAWA, M. M. Erythrocyte parameters and condition factor of *Gymnotus* sp. (Gymnotiformes: Gymnotidae) under growing conditions. *Revista Brasileira de Medicina Veterinária*, v. 40, e20318, 2018b.

VENTURA, A. S.; ISHIKAWA, M. M.; GABRIEL, A. M. A.; SILBIGER, H. L. N.; CAVICHIOLO, F.; TAKEMOTO, R. M. Histopathology from liver of *tuvira* (*Gymnotus* spp.) parasitized by larvae of nematodes. *Ciência Rural*, v. 46, n. 7, p. 1233-1239, 2016.

VIDAL, L. V. O.; ALBINATI, R. C. B.; ALBINATI, A. C. L.; LIRA, A. D.; ALMEIDA, T. R.; SANTOS, G. B. Eugenol como anestésico para a tilápia-do-Nilo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 43, n. 8, p. 1069-1074, 2008.

VIEIRA, B. B.; PEREIRA, E. L. Potencial dos probióticos para uso na aquicultura. *Revista da Universidade Vale do Rio Verde*, v. 14, n. 2, p. 1223-1241, 2016.

ZHU, F. A review on the application of herbal medicines in the disease control of aquatic animals. *Aquaculture*, v. 526, p. 735422, 2020.

# AVANÇOS E DESAFIOS PARA A CONSERVAÇÃO E O MANEJO SUSTENTÁVEL DE ABELHAS-SEM-FERRÃO

*Cristiano Menezes, Ana Carolina Martins de Queiroz, Kátia Sampaio Malagodi-Braga e Ricardo Costa Rodrigues de Camargo*

## INTRODUÇÃO

As atividades relacionadas à criação, manejo e conservação de abelhas nativas vêm ganhando destaque em todo o mundo. O assunto gerou muita repercussão na última década por parte da mídia, dos órgãos governamentais e da população. O resultado foi um boom na demanda por informações, materiais relacionados à atividade, colônias e técnicas de manejo mais eficientes. O segmento avançou em praticamente todas as direções possíveis. As abelhas nativas têm sido amplamente usadas em atividades de educação ambiental, em ações efetivas de conservação ambiental, na produção de mel e outros produtos da colônia, na polinização agrícola e até em atividades de lazer. Avanços importantes na pesquisa básica estão contribuindo para ampliar o conhecimento desse grupo. As pesquisas aplicadas também avançaram significativamente, oferecendo técnicas de manejo eficientes que permitem aos criadores multiplicar as colônias artificialmente, de forma que, para muitas espécies, a atividade não depende mais da retirada de colônias da natureza para ser ampliada. As regulamentações que envolvem o segmento estão melhorando gradativamente e a perspectiva é que elas deixem de ser um entrave tão relevante no futuro.

Ainda existem desafios acadêmicos a serem superados, como a limitação do conhecimento taxonômico das populações e subpopulações das espécies manejadas, os limites de crescimento sustentável do setor produtivo e os possíveis impactos da criação e transporte de abelhas dentro e fora de suas áreas de ocorrência natural. Há, também, desafios práticos do setor produtivo a serem superados, como a burocracia relativa ao registro dos criadores e comercialização dos produtos no mercado formal, a fiscalização e a mitigação da adulteração dos produtos, os conflitos com sistemas de agricultura convencional e o uso de agrotóxicos e a necessidade de apoio público para a expansão da atividade. A criação de abelhas nativas tem todas as credenciais para se

tornar um dos casos de sucesso mais relevantes do uso da biodiversidade em benefício da sociedade brasileira. Porém, para ser concretizado, o caminho da sustentabilidade depende, dentre outros fatores, da integração da academia, do setor produtivo e dos órgãos públicos.

A meliponicultura, atividade de criação das abelhas-sem-ferrão, é uma das poucas atividades produtivas que atende a todos os princípios da produção sustentável, integrando aspectos culturais, regionais, ambientais, econômicos e sociais (Cortopassi-Laurino et al., 2006; Contrera et al., 2011). Apresenta inúmeras possibilidades de uso, como a produção e a comercialização dos diversos produtos das abelhas, a prestação de serviços, como a disponibilização de colônias para a polinização na agricultura, e o uso para fins de educação e conservação ambiental. Por causa dessa amplitude, a meliponicultura vem despertando cada vez mais o interesse da sociedade.

O crescente interesse da população pela atividade nos últimos anos pode gerar a impressão de que a meliponicultura é algo contemporâneo. Na realidade, a relação entre o homem e esse grupo de abelhas remonta ao período pré-colombiano, em que os povos originários das Américas mantinham uma estreita relação com essas abelhas. Além do interesse desses povos no mel, como adoçante e fonte de energia, ele também era utilizado, com frequência, na medicina tradicional, em cerimônias e no comércio (Schwarz, 1948; Weaver; Weaver, 1981). Os aspectos espirituais e religiosos causados pela presença de divindades relacionadas com o ser “abelha” e o uso de seus produtos em cerimônias e práticas religiosas ocupavam um importante espaço nessas culturas, fato identificado em diversos registros arqueológicos encontrados na região da Mesoamérica e no atual território do México (Crane, 1992; Zralka et al., 2014; Sotelo-Santos & Asomoza, 2018; Quezada-Euán, 2018).

Outro aspecto importante dessa relação secular dos povos originários das américas e das abelhas nativas sem ferrão está relacionado com o desenvolvimento das primeiras técnicas de criação artificial desses animais, que vão além do conhecimento tradicional puramente extrativista. As colônias começaram a ser manejadas fora do seu habitat natural, de forma artificial, em troncos roliços (jobones), em potes de barro, como colmeias, e em artefatos artificiais de dois andares semelhantes às colmeias modulares contemporâneas (De Landa, 1566; Schwarz, 1948; Cappas-e-Souza, 1995; González-Acereto, 2008; Arnold et al., 2018; Quezada-Euán, 2018).

No Brasil, são inúmeros os registros da relação dos diferentes povos indígenas com as abelhas-sem-ferrão, como os kayapós, que desenvolveram uma profunda tradição e conhecimento sobre elas (Camargo; Posey, 1990), sabendo identificar 56 diferentes espécies e reconhecendo as diferenças dos ninhos e do estágio de desenvolvimento (Posey, 1983, 1986). Outros grupos, como os enawenê-nawê e os kaiabi, de Mato Grosso, e os kawaieté, que vivem no baixo Rio Xingu, também sabem iden-

tificar, 48, 23 e 37 espécies, respectivamente (Costa-Neto, 1998; Santos & Antonini, 2008; Villas-Bôas, 2012).

Sendo assim, tais povos têm importância histórica no processo de domesticação de várias das espécies criadas atualmente. Esse valor cultural e o conhecimento sobre as abelhas e seu manejo foram passados de forma oral de geração em geração, disseminando essas práticas e costumes entre diversos povos indígenas e comunidades tradicionais.

Nas últimas décadas, ocorreu um grande avanço nas técnicas de manejo a partir da dedicação dos meliponicultores mais experientes em diferentes regiões do país. Esse desenvolvimento se deve aos pesquisadores pioneiros dessa temática, que contribuíram diretamente para a formação de novos pesquisadores e de diversos centros e grupos de pesquisa sobre o tema, distribuídos no país como um todo (Kerr et al., 1996; Nogueira-Neto, 1997). Esse trabalho conjunto entre a academia e os institutos de pesquisa e o setor produtivo deu continuidade e incrementou esse processo histórico de domesticação, que permanece em constante desenvolvimento.

Assim, temos cada vez mais espécies sendo estudadas e criadas em colmeias desenvolvidas a partir de suas características biológicas e com técnicas de manejo específicas. Essas espécies se adaptaram a diferentes condições de criação, como adensamento de colônias de diversas espécies no mesmo local ou com maior proximidade entre elas, situação que não seria encontrada nos ambientes naturais.

Todo esse interesse pelas abelhas-sem-ferrão também fez proliferar os ambientes virtuais de divulgação e difusão das práticas de manejo. Nos últimos anos, percebe-se um claro avanço na organização do setor, com a criação de inúmeras associações de meliponicultores, grupos de internet e coletivos nas diversas regiões do país. Outro processo evidenciado foi a inclusão da meliponicultura no âmbito das associações e federações, antes constituídas apenas por apicultores, a partir do interesse pela criação das abelhas-sem-ferrão, talvez pela facilidade de manejo, com menor exigência física que a apicultura, e pela possibilidade de instalar as colônias nos próprios domicílios, inclusive em ambientes urbanos.

## AVANÇOS RECENTES NO CONHECIMENTO BÁSICO DAS ABELHAS-SEM-FERRÃO

### Biologia Geral e Comportamento

As abelhas-sem-ferrão fazem parte de um grupo de insetos eussociais altamente diversificado presente em praticamente toda região tropical e subtropical do globo, incluindo a América, a África, a Ásia e a Oceania. São conhecidas cerca de 550 espécies

diferentes com ampla variação biológica em termos de morfologia, comportamento, tamanho populacional, arquitetura de ninho e características dos seus produtos (Grüeter, 2020). Por causa dessa diversidade, o grupo tem se mostrado um verdadeiro tesouro de novidades biológicas, inclusive nas espécies mais comuns e frequentemente estudadas (Figura 8.1). Duas descobertas recentes feitas por pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente e seus colaboradores exemplificam muito bem a dimensão desse tesouro.

Foto: Cristiano Menezes



**Figura 8.1.** Diversidade de espécies de abelhas-sem-ferrão criadas com diferentes finalidades, como produção de mel e própolis, polinização de cultivos agrícolas, educação ambiental ou como animal de estimação (espécies representadas em ordem de tamanho, de cima para baixo, da esquerda para direita: *Melipona fasciculata*, *M. scutellaris*, *M. mondury*, *M. quadrifasciata*, *M. bicolor*, *M. flavolineata*, *Tetragona clavipes*, *Scaptotrigona postica*, *S. xanthotricha*, *Friesoemelitta varia*, *Tetragonisca angustula*, *Nannotrigona testaceicornes*, *Plebeia droryana*, *Friesella schrottkyi*, *P. mínima* e *Leurotrigona muelleri*).

Uma dessas novidades foi a descoberta do primeiro caso de uma subcasta especializada na atividade de defesa entre abelhas eussociais, como já é bem conhecido em formigas e cupins (Menezes et al., 2012). As guardas da jataí (*Tetragonisca angustula*) são cerca de 30% maiores e morfologicamente diferentes das operárias responsáveis pela coleta de alimento, as forrageiras. Posteriormente, uma investigação mais detalhada no grupo Meliponini que explorou as diferenças entre guardas e forrageiras constatou que a existência de guardas especializadas é relativamente comum (Figura 8.2). O surgimento de abelhas-sem-ferrão parasitas foi a força motriz que impulsionou a evolução da diferenciação de operárias (Grüter et al., 2017). Esse conhecimento pode ajudar a lidar com problemas sérios do setor produtivo, pois, em muitas regiões, o ataque das abelhas

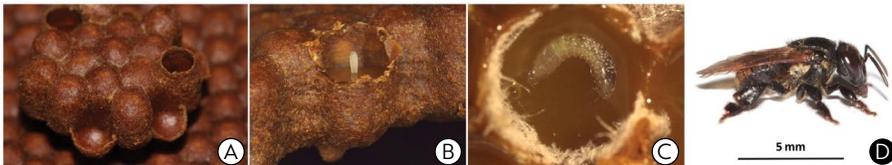
ladras é um problema crônico da atividade. A compreensão dos sistemas de defesa das abelhas está ajudando a proteger a criação desses ataques (Rech et al., 2013).



Foto: Cristiano Menezes

**Figura 8.2.** Diferença morfológica entre guarda (à esquerda) e forrageira (à direita) de *Frieseomelitta flavicornis*. As guardas são mais escuras e carregam resinas apenas nas pernas, enquanto as forrageiras são mais claras e carregam grande quantidade de resinas no tórax. Entre 28 espécies estudadas, dez têm guardas maiores que as forrageiras (Grüter et al. 2017).

A segunda novidade na biologia básica dessas abelhas que expandiu os horizontes da pesquisa sobre esse grupo foi a descoberta do primeiro caso de agricultura de fungos realizada por uma espécie de abelha (Figura 8.3). Menezes et al. (2015) descobriram que a abelha mandaguari (*Scaptotrigona depilis*) cultiva, dentro da célula de cria, um fungo que serve de alimento para as larvas. Sem ele, as larvas não conseguem se desenvolver e morrem. Pesquisas posteriores indicaram que existe uma complexa rede de microrganismos vivendo no alimento larval, com o protagonismo de pelo menos três fungos (Paludo et al., 2019). *Monascus ruber* e um fungo do gênero *Starmerella* parecem funcionar como reguladores de crescimento, enquanto uma levedura do gênero *Zygosaccharomyces*, rica em um tipo de lipídio, é essencial para o desenvolvimento da larva (Paludo et al., 2018).



**Figura 8.3.** A abelha mandaguari (*Scaptotrigona depilis*) cultiva uma complexa rede de fungos que fornece um tipo específico de lipídio do qual a larva depende para completar seu desenvolvimento. (A) células de cria; (B) ovo sobre o alimento larval; (C) leveduras do gênero *Zygosaccharomyces*, da qual as larvas se alimentam, crescendo nas paredes da célula de cria; (D) operária adulta.

Essa descoberta tem destaque importante no cenário agrícola por causar preocupação quanto a uma classe de produtos que tradicionalmente não representava risco aos polinizadores, os fungicidas e bactericidas. Muitos deles são utilizados justamente durante as florações, e os impactos que podem gerar nas relações de simbiose entre as abelhas e microrganismos ainda são desconhecidos. É mais um exemplo de conhecimento básico que contribuirá com o setor agrícola à medida que as pesquisas avançam.

Essas pesquisas também estão gerando desdobramentos positivos em relação aos produtos da meliponicultura. A relação das abelhas-sem-ferrão com microrganismos está se mostrando muito mais importante do que se pensava, e esse aspecto pode ser o grande diferencial desse grupo (De Paula et al., 2021). As espécies de abelhas-sem-ferrão não desidratam tanto o mel quanto as abelhas africanizadas (*Apis mellifera*). Assim, a quantidade de água que permanece no mel, acima de 20%, permite que microrganismos benéficos proliferem ali, fermentando-o (Souza et al. 2021). Embora não se conheçam detalhes desse processo, existem evidências da ocorrência da fermentação natural dentro dos potes fechados de alimento: a espuma, comumente observada na superfície do mel, indica a formação de bolhas de gás devido, provavelmente, à fermentação alcoólica (Souza et al. 2007; Menezes et al., 2013). Depois, na presença de oxigênio, o álcool é transformado em ácido acético (Menezes et al., 2013), conferindo ao mel das abelhas-sem-ferrão a acidez característica de seu sabor.

É bem provável que outros processos metabólicos ou fermentativos mais complexos ocorram no mel, determinando suas propriedades, gerando aromas, antibióticos, antioxidantes ou outras substâncias benéficas relacionadas ao uso tradicional desse produto como medicamento (De Paula et al., 2021; Souza et al. 2021). A falta de conhecimentos sobre esses processos representa uma grande oportunidade de avanço no conhecimento científico e para a descoberta de novos microrganismos, processos bioquímicos e moléculas bioativas de interesse para o ser humano.

Ainda no campo da biologia básica, diversos aspectos da reprodução dessas abelhas foram elucidados e poderão contribuir para a formação da base de conhecimento da meliponicultura, mesmo que ainda não possam ser aplicados ao cotidiano dessa atividade. Entre esses avanços, destacamos: o comportamento sexual de algumas espécies (Alves et al., 2011; Kärcher et al., 2013; Santos et al., 2014; Veiga et al., 2018; Vollet-Neto et al., 2018; Veiga et al., 2021); o conhecimento sobre a organização social e a divisão de tarefas entre as operárias (Jones et al., 2012; Segers et al., 2015; Hammel et al., 2016; Mateus et al., 2019); o efeito do estresse prolongado na longevidade e no comportamento (Veiga et al., 2012; Vollet-Neto et al., 2014; Gomes et al., 2015); uma melhor compreensão da dinâmica no uso dos recursos florais em diferentes estações do ano (Aleixo et al., 2017); e o conhecimento de detalhes de sua alimentação (Vollet-Neto et al., 2017).

## RELAÇÕES ENTRE ABELHAS E PLANTAS

As interações entre as plantas com flores e as abelhas iniciaram-se há cerca de 120 milhões de anos e foram sendo moldadas pela seleção natural ao longo do tempo evolutivo. Assim, a grande maioria das abelhas nativas é atraída por flores na busca por recursos essenciais para a sua sobrevivência e reprodução (Figura 8.4). Para elas, os recursos florais são o pólen, o néctar, os óleos e as fragrâncias. Além disso, as plantas podem oferecer local e materiais para a construção do ninho e abrigar diversas espécies de abelhas. Por sua vez, as plantas com flores podem receber das abelhas o serviço de polinização que resulta na formação de frutos e sementes e garante a continuidade das espécies pela reprodução.

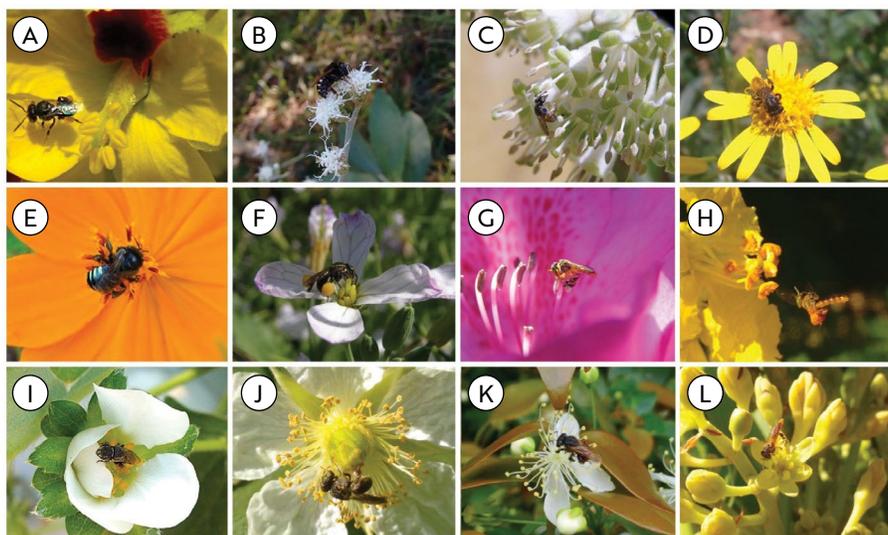


Foto: Kátia Braga

**Figura 8.4.** Plantas com flores que oferecem recursos para as abelhas-sem-ferrão. (A) pau-brasil (*Pau-brasilia echinata*), (B) assa-peixe (*Vernonanthura* sp), (C) marianeira (*Acnistus arborescens*), (D) flor-das-almas (*Senecio brasiliensis*), (E) cosmos (*Cosmos sulphureus*), (F) nabo-forrageiro (*Raphanus sativus*), (G) azaleia (*Rhododendron simsii*), (H) canafistula (*Peltophorum dubium*), (I) morangueiro (*Fragaria x ananassa*), (J) calabura (*Muntingia calabura*), (K) pitangueira (*Eugenia uniflora*), (L) abacateiro (*Persea americana*).

Entre as interações, deve-se destacar a estreita relação existente entre as abelhas nativas e as espécies arbóreas em florestas tropicais. Na Floresta da Cantareira (São Paulo, SP), por exemplo, as abelhas-sem-ferrão utilizaram recursos florais de 73% de 96 espécies de plantas observadas em floração, forrageando principalmente no dossel da floresta e representando 70% de todas as abelhas em atividade nas flores das árvo-

res (Ramalho, 2004). Esse conhecimento tem revelado o importante papel das árvores das florestas tropicais na manutenção e conservação das populações de abelhas nativas de diferentes espécies, particularmente das abelhas-sem-ferrão.

Estudo recente realizado pela Embrapa Meio Ambiente (Jaguariúna, SP) em plantas com flores utilizadas em sistemas agroflorestais biodiversos verificou que, ao longo do ano, as abelhas-sem-ferrão utilizaram como fonte de recursos florais 84,2% das 76 espécies de plantas avaliadas, sendo metade delas arbóreas nativas (Lima et al., 2020). Vale destacar que, nesse estudo, as abelhas africanizadas (*A. mellifera*) comparilharam a maioria das espécies visitadas com as abelhas-sem-ferrão, e com as abelhas nativas com ferrão cerca de um terço apenas. Tal resultado está relacionado à existência de uma maior semelhança biológica entre as duas primeiras e é importante por apontar a necessidade de avaliar o impacto da criação e do deslocamento de um grande número de colmeias de abelhas africanizadas nas populações de abelhas-sem-ferrão, silvestres e manejadas (presentes em meliponários).

Apesar do local de estudo ser uma área rural bastante antropizada, se obteve uma riqueza considerável de abelhas-sem-ferrão (Meliponini): 14 espécies, sendo cinco criadas no local. É mais uma evidência de que a manutenção de uma diversidade de recursos florais na propriedade rural contribui para a manutenção das comunidades de polinizadores (Carvalho et al., 2010; Nicholls; Altieri, 2013).

Por outro lado, nem sempre essa relação entre abelhas e plantas ocorre de forma harmoniosa. Vários são os exemplos de flores que apresentam substâncias tóxicas no pólen ou néctar (Adler, 2000; Hargreaves et al., 2009). Abelhas que utilizam esses recursos alimentares podem sofrer graves consequências, incluindo mortalidade de larvas e adultos e redução na longevidade. Exemplos foram registrados no néctar e pólen de espécies nativas, como o falso barbatimão *Dimorphandra mollis* Benth (Leguminosae) e o barbatimão-verdadeiro *Stryphnodendron adstringens* (Martius) Coville (Carvalho; Message, 2004; Santoro et al., 2004; Cintra et al., 2005), e espécies exóticas, como a espatódea ou tulipeira-africana (*Spathodea campanulata*) e o neem (*Azadirachta indica*) (Portugal-Araújo, 1963; Nogueira- Neto, 1997; Oliveira et al., 1991; Trigo; Santos, 2000; Calligaris, 2002; Alves, 2010; Queiroz et al., 2014). Em ensaios laboratoriais, foi verificado uma mortalidade significativamente maior de operárias recém-emergidas das espécies *Melipona fasciculata* e *M. seminigra* que consumiram tanto néctar quanto pólen de espatódea, quando comparadas às que consumiram alimento natural (Queiroz et al., 2014). Esses estudos demonstram a importância de evitar o plantio dessas espécies tóxicas próximo a locais de criação de abelhas, especialmente de plantas exóticas, uma vez que essas interações são mais recentes, podendo resultar em maiores danos para as abelhas. A inclusão de uma diversidade de espécies arbóreas nativas no “desenho” e o enriquecimento dos agroecossistemas, como nos sistemas agroflorestais biodiversos (ver capítulo “Contribuições da pesquisa ao desenvolvimento e adoção de Sistemas

Agroflorestais Agroecológicos”), são necessários para a conservação das abelhas nativas do Brasil e para o desenvolvimento da meliponicultura, entre outros benefícios.

Nesse contexto, uma das perguntas frequentes feitas por agricultores e meliponicultores é sobre o que plantar para beneficiar as abelhas. Diversos estudos que avaliaram a origem do alimento armazenado pelas abelhas-sem-ferrão obtiveram um padrão de forrageamento semelhante para diferentes espécies, mesmo com alguma variação em suas metodologias e em diferentes ambientes (Engels; Dingemans-Bakels, 1980; Sommeijer et al., 1983; Imperatriz-Fonseca et al., 1984; Ramalho et al., 1985; Kleinert-Giovannini; Imperatriz-Fonseca, 1987; Kleinert-Giovannini et al., 1987; Cortopassi-Laurino; Ramalho, 1988; Guibu et al., 1989; Imperatriz-Fonseca et al., 1989; Ramalho, 1990; Malagodi-Braga; Kleinert, 1992; 2009). Esses estudos revelaram que, apesar de as abelhas-sem-ferrão utilizarem dezenas de espécies de plantas ao longo do ano, uma pequena porcentagem delas é responsável pela maior parte do pólen armazenado nos potes de alimento.

Recentemente, o mesmo resultado foi obtido em uma área urbana por Aleixo et al. (2017). Esses autores verificaram que a abelha *S. depilis* utilizou 66 espécies de plantas para obter alimento ao longo do ano, sendo apenas nove responsáveis por aproximadamente 80% de todo o alimento armazenado nas colônias. Com essas informações disponibilizadas sobre diferentes espécies de abelhas-sem-ferrão, será possível direcionar o plantio para as plantas preferencialmente utilizadas por elas para a coleta de pólen e néctar ao longo do ano.

Essas informações se aplicam, ainda, ao plantio em ambientes urbanos e áreas de recuperação e restauração ambiental, tanto com foco na conservação de abelhas nativas quanto na sua criação em ambientes antropizados. Deve-se lembrar na hora de escolher as plantas que cada espécie de abelha tem suas preferências e que plantas menos representativas também são importantes para compor a dieta como um todo (Ramalho, 2004; Aleixo et al., 2017).

As mudanças no uso da terra, como a perda do habitat das abelhas devido ao desmatamento e à fragmentação das paisagens naturais, e a intensificação dos sistemas agrícolas convencionais são consideradas os motores do declínio das populações de polinizadores silvestres em todo o mundo, porque limitam a oferta de recursos florais (Potts et al. 2016a). Diante desse diagnóstico e dos riscos que as mudanças climáticas representam para a agropecuária e para os polinizadores silvestres e manejados, ações de pesquisa para sua conservação e o conhecimento das suas relações com as plantas tornam-se essenciais. Nesse sentido, a Embrapa Meio Ambiente participa, desde 2015, do projeto de Conservação in situ de Recursos Genéticos Animais, de âmbito nacional, que resultou no núcleo de conservação de abelhas-sem-ferrão da região Sudeste, bem como de outros projetos, que visam avançar no conhecimento das interações entre essas abelhas e as plantas em áreas de produção agrícola.

## AVANÇOS RECENTES NO CONHECIMENTO APLICADO

### Caracterização dos Produtos

Ainda há um vasto campo a ser explorado quanto às características físico-químicas e às propriedades funcionais e terapêuticas dos produtos das abelhas-sem-ferrão, que podem inclusive validar o conhecimento tradicional envolvido nesses produtos. Contudo, houve um claro avanço nessa área do conhecimento. Principalmente em relação ao mel, inúmeros estudos realizados nas últimas décadas, incluindo artigos científicos publicados (Carvalho et al., 2005; Camargo, et al., 2017) e uma norma técnica (NBR-ABNT 16581:2017), estabeleceram uma base técnica referencial que contribuiu diretamente para a formulação de políticas públicas, resultando na elaboração de várias normativas estaduais: Amazonas (Adaf, 2016), Bahia (Adab, 2014), Espírito Santo (Idaf, 2019), Paraná (Adapar, 2017), São Paulo (SAA, 2017) e Santa Catarina (SAR, 2020).

Com o estabelecimento dos requisitos de processamento e segurança do alimento para o consumo humano direto, esse produto especial, antes produzido e comercializado de forma empírica nos ambientes informais, passou a ser comercializado em pontos de venda fiscalizados. Atualmente já existem méis de várias marcas comerciais disponíveis para o consumidor. Inclusive, comunidades tradicionais, a partir de modelos associativos, e até mesmo comunidades indígenas, com apoio do setor privado e do terceiro setor, vêm se organizando e se adequando às exigências legais para a comercialização dos produtos oriundos da meliponicultura.

Os produtos das abelhas são considerados produtos de origem animal e, portanto, estão sob a regulamentação e fiscalização do Ministério da Agricultura e Pecuária. Entretanto, no âmbito federal, ainda não existe um Regulamento Técnico de Identidade e Padrão para esses méis como existe para o mel das abelhas africanizadas do gênero *Apis* (Brasil, 2000), embora a separação dos produtos dessas abelhas e das abelhas-sem-ferrão tenha se estabelecido no processo de revisão do antigo Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal (Riispoa). Esse regulamento promoveu a separação na identidade desses méis e dos outros produtos das abelhas enquanto classe de produtos, e gerou, portanto, a necessidade de elaborar regulamentos específicos para cada um deles, situação que ainda permanece pendente.

Outros produtos, como a própolis e a geoprópolis, também passaram a ser caracterizados e mais estudados recentemente, sobretudo em relação às suas atividades antimicrobianas e à sua composição química (Cardozo et al., 2015; Bonamigo et al., 2017; dos Santos et al., 2017; Souza et al., 2018; Ferreira et al., 2019; Rubinho et al., 2019; Gabriel et al., 2021).

O pólen das abelhas-sem-ferrão, denominado popularmente de saburá, apresenta especificidades e características bem distintas em relação ao pólen apícola, não só sob o ponto de vista físico-químico, mas também pela forma como é armazenado por essas abelhas em potes de cerume (cera e resina). A partir da ação de microrganismos presentes no ambiente da colônia e pela inclusão de substâncias produzidas pelas abelhas (enzimas) e de néctar, o pólen armazenado sofrerá um processo de fermentação natural (Menezes et al., 2018; Teixeira et al., 2019). Dessa forma, mesmo que alguns estudos já tenham buscado conhecer melhor esse produto, ainda é necessário caracterizar mais detalhadamente sua composição e suas propriedades funcionais, assim como desenvolver e validar tecnologias de produção e processamento.

Em função da grande diversidade de espécies de abelhas desse grupo, envolvidas no contexto da meliponicultura, e da rica flora presente em nosso território, a produção de conhecimento sobre as características e funcionalidades dos produtos das abelhas-sem-ferrão torna-se um enorme desafio.

## Alimentação Suplementar

A alimentação suplementar das colônias é uma prática importante para garantir o crescimento e sobrevivência das colônias, o sucesso das multiplicações e o aumento na produtividade (Jaffé et al., 2015), especialmente em situações excepcionais, como em períodos ou locais de escassez de recursos e em uma produção de escala comercial. A alimentação complementar energética pode ser facilmente substituída por formulações de xaropes à base de açúcar (Nogueira-Neto, 1997; Villas-Bôas, 2012). Esse xarope pode ser oferecido individualmente a cada colônia ou em alimentadores coletivos (Contrera et al., 2015).

No entanto, o pólen, principal fonte proteica e essencial na alimentação das larvas, é um alimento nutricionalmente complexo e de difícil substituição. Vários alimentos alternativos têm sido testados como substitutos proteicos, sendo a soja um dos mais utilizados, inclusive para abelhas dos gêneros *Melipona* e *Scaptotrigona* (Costa & Venturieri, 2009; Pires et al., 2009; Teixeira et al., 2019; Queiroz et al., 2019). Utilizando um alimento semiartificial à base de extrato de soja fermentado com o pólen da espécie estudada, foi observado que essa fórmula não prejudicou a sobrevivência nem o tamanho dos imaturos (Teixeira et al., 2019), mas diminuiu a longevidade de abelhas das espécies *Scaptotrigona postica* e *Melipona flavolineata*, quando comparadas às que consumiram apenas pólen natural (Queiroz et al., 2019; Teixeira et al., 2019). Embora esses estudos tragam contribuições quanto à composição química e ao efeito da fermentação natural nesse alimento e à recomendação de fórmulas mais eficientes para a nutrição das abelhas, é necessário aprimorar essas dietas, para garantir a viabilidade de colônias recém-formadas e seu fortalecimento em períodos de escassez.

Vale ressaltar que o desenvolvimento dessas dietas à base de alimentos seguros e padronizados ganhou mais importância recentemente. Muitos casos de cria pútrida europeia, uma doença relevante da apicultura, estão sendo encontrados em colônias de abelhas-sem-ferrão e causando grandes prejuízos aos criadores (São Paulo, 2019). A principal suspeita é que a infecção esteja ocorrendo por meio da alimentação com pólen contaminado oriundo da apicultura. Diante desse risco, os meliponicultores devem evitar o uso de produtos da apicultura nas colônias de abelhas-sem-ferrão.

## Modelos de Caixas

Há uma enorme diversidade de modelos de caixas para as abelhas-sem-ferrão sendo utilizadas por meliponicultores (p. ex. modelos Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia [Inpa], Embrapa, Paulo Nogueira Neto [PNN] e suas adaptações). Essas diferenças se relacionam tanto com a vasta diversidade de espécies encontradas (Venturieri et al., 2012) quanto com as preferências de cada meliponicultor. De forma geral, os modelos de caixa podem ser divididos em verticais ou horizontais. Embora vários modelos sejam utilizados de maneira satisfatória, alguns estudos recentes apontam uma maior facilidade de manejo em caixas verticais, especialmente na prática de multiplicação de colônias (Leão et al., 2016).

## Novas Técnicas de Multiplicação de Colônias

Atualmente a meliponicultura não precisa mais recorrer aos estoques naturais para obter novas colônias e aumentar a escala de produção. A multiplicação artificial utilizando métodos já consolidados é eficiente e permite a ampliação gradativa do plantel à medida que o número de criadores se amplia. Por outro lado, o crescimento da demanda nos últimos anos tem superado a oferta, aumentando a necessidade de desenvolvimento de técnicas mais produtivas de multiplicação. Por isso, diversos grupos de pesquisa brasileiros estão investindo em inovações nesse segmento com resultados promissores.

Uma inovação importante foi o aperfeiçoamento das técnicas de produção de rainhas *in vitro*. O princípio de funcionamento da técnica é relativamente simples: larvas de operárias alimentadas com doses extras de alimento larval em laboratório se tornam rainhas. Contudo, fez-se necessário um longo período para a otimização da técnica, com ajustes finos no controle de umidade e nos procedimentos de manipulação e manutenção das larvas. Atualmente, com taxas de sobrevivência superiores a 90%, já é possível produzir rainhas em grande escala para várias espécies, como *S. depilis*, *T. angustula*, *Friesoemellita varia*, *Nannotrigona testaceicornes* e *Plebeia droryana* (Menezes; Imperatriz-Fonseca, 2008; Baptistela et al., 2012; Menezes et al., 2013; Prato e Soares, 2013).

A possibilidade de obter rainhas *in vitro* e alimentar as colônias artificialmente abriu portas para uma alternativa de multiplicação, com base na formação de colônias a partir de pequenos núcleos, conhecidos como minicolônias. O método se mostrou viável, ou seja, foi possível obter colônias com sucesso a partir de 5–10% de material biológico da colônia-mãe para algumas espécies (Figura 8.5).



Foto: Cristiano Menezes

**Figura 8.5:** Avanços nas tecnologias de criação das abelhas-sem-ferrão, com a produção de rainhas *in vitro*, controle da fecundação, desenvolvimento de dietas artificiais, adensamento de colmeias e confinamento nas fases iniciais de formação.

Um fator limitante, identificado ao longo dos trabalhos de desenvolvimento da multiplicação de ninhos em larga escala, foi a dificuldade em manter as matrizes em um local com grande adensamento de colônias. Por mais que recursos alimentares fossem oferecidos artificialmente, havia uma forte dependência das fontes naturais de alimentos, resinas vegetais e outros recursos para manutenção da saúde dessas colônias. Portanto, um dos caminhos para o futuro será estabelecer uma rede de criadores, cada um produzindo em escala menor do que se tinha pensado anteriormente, mas que, em conjunto, consigam atender à demanda crescente por colônias. Um sistema nesses moldes teria vantagens relevantes em comparação com uma grande estrutura de produção em larga escala e evitaria os problemas já identificados nas grandes biofábricas de mamangavas ao redor do mundo (Vollet-Neto; Menezes, 2018; Aizen et al., 2020; Garibaldi et al., 2021). Pequenas estruturas de produção podem focar na criação das espécies ou subpopulações da sua própria região de atuação, o que reduziria a distância percorrida pelas colônias transportadas e os riscos ambientais causados pela introdução de subpopulações não naturais no local de destino. Esse sistema também reduziria os riscos de disseminação de doenças, porque, uma vez identificado o foco de determinado patógeno, seria mais fácil controlá-lo. Além disso, esse modelo proporciona maior benefício social. A estruturação de meliponários de pequeno e médio porte possibilita a geração de renda para mais pessoas e favorece especialmente as que atuarem próximas a áreas bem conservadas.

Iniciativas inovadoras que contemplam essa linha de raciocínio têm surgido nos últimos anos. Empresas oferecem uma plataforma digital que integra agricultores que demandam abelhas com apicultores e meliponicultores que têm polinizadores disponíveis em suas regiões. Essa tecnologia favorece os pequenos criadores e reduz a distância de deslocamento das colmeias até as plantações. Há outras iniciativas de destaque no segmento de mel e produtos naturais. Um exemplo é um empreendimento com foco na qualificação de mulheres do campo na produção e processamento de mel, própolis e cera de abelhas nativas sem ferrão. A ideia é formar uma grande rede de colaboradoras que consigam atingir escala comercial em conjunto, ao mesmo tempo contribuindo para a conservação da biodiversidade.

A meliponicultura precisa aumentar a escala de produção para se tornar relevante para o país e, ao mesmo tempo, continuar sendo uma atividade benéfica ao meio ambiente. Ainda há muito espaço para aprimoramentos e inovações nos processos de multiplicação de colônias. Contudo, é fundamental que os avanços sejam norteados pelos conceitos de sustentabilidade, de forma que não gerem consequências negativas para o meio ambiente. Afinal, esse é um dos principais pilares do segmento.

## MANEJO DE ABELHAS PARA A POLINIZAÇÃO AGRÍCOLA

Os polinizadores estão fortemente relacionados ao bem-estar humano, à saúde e função dos ecossistemas, à reprodução das plantas silvestres, à produção agrícola e à segurança alimentar. No Brasil, a compilação de dados publicados sobre a polinização revelou que cerca de 80% das plantas silvestres e cultivadas relacionadas à produção de alimentos têm a participação das abelhas na polinização, representando o grupo de polinizadores com maior número de espécies (Wolowski et al., 2018). Em estudo realizado ao redor do mundo, incluindo o Brasil, verificou-se que, em diversas culturas, o aumento na visitação por abelhas nativas teve melhor resultado na frutificação que o aumento equivalente na visitação por *A. mellifera*, a abelha mais manejada pelo ser humano (Garibaldi et al., 2013).

É importante destacar que a presença de uma diversidade de abelhas nas flores pode resultar em melhorias na qualidade da produção que vão além do aumento da produtividade. A complementação na polinização que resulta do comportamento diferenciado de várias espécies de abelhas na flor do morangueiro, por exemplo, além de aumentar o peso (massa fresca) dos frutos, resulta em morangos com maior durabilidade para comercialização in natura (Klatt et al., 2014) e sem deformações (Malagodi-Braga, 2018). No girassol, a diversidade de abelhas na polinização resulta em sementes com maior peso (massa fresca) e teor de vitamina E (Silva et al., 2018). Além disso, a estabilidade temporal e espacial dessa diversidade de abelhas é fundamen-

tal para garantir a produtividade das colheitas e sua previsibilidade (Garibaldi et al., 2011). Da mesma forma, a manutenção de uma diversidade de abelhas é fundamental para a conservação de populações naturais de plantas e animais, contribuindo para o bom funcionamento dos ecossistemas e a manutenção de outros serviços ambientais tão importantes para a agricultura quanto a polinização.

A constatação da deficiência na polinização na produção de frutos e sementes tem aumentado o interesse pelo manejo e criação das abelhas-sem-ferrão por parte de agricultores e técnicos, meliponicultores e empresas, como startups, que encontram nessa demanda uma oportunidade de negócio e inovação. Nesse sentido, é importante destacar que as pesquisas desenvolvidas pela Embrapa Meio Ambiente, com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp) e da própria Embrapa, têm resultado em recomendações técnicas importantes para o setor produtivo. Recomendações essas que vão desde as espécies de abelhas que são atraídas e polinizam a cultura-alvo até as práticas de manejo e de gestão da propriedade adequadas para favorecer a presença de uma diversidade de abelhas silvestres nas lavouras em diferentes sistemas de produção (Malagodi-Braga, 2018).

Além disso, resultados de estudos preliminares ou experimentais sob condições controladas em casa-de-vegetação nem sempre se aplicam às condições das lavouras comerciais no campo. Isso foi verificado, por exemplo, para as abelhas mandaguari (*S. depilis*), que, mesmo com várias colmeias instaladas em oito lavouras comerciais de morango, não foram atraídas pelas flores em nenhuma delas. Portanto, aprofundar e divulgar esse conhecimento básico é papel da pesquisa, para que não haja equívocos no manejo de abelhas em áreas agrícolas, uma vez que, em geral, as abelhas nativas e sua biologia não são conhecidas popularmente.

Outra demanda importante para o setor produtivo é a definição de protocolos que possam ser aplicados pelos próprios agricultores e técnicos para diagnosticar a deficiência de polinização nas lavouras. Para o morangueiro, o protocolo já foi estabelecido e está disponível para esse público (Malagodi-Braga, 2018).

Quanto ao manejo de abelhas em áreas de produção agrícola, a pesquisa ainda tem muito a contribuir com a avaliação do impacto ocasionado pela introdução de grande número de colmeias sobre a fauna silvestre de abelhas nas áreas de produção e em seu entorno. Também deve contribuir para determinar os impactos desse manejo sobre as próprias abelhas. Em áreas agrícolas, as abelhas irão compartilhar recursos ou mesmo competir por eles em um ambiente, em geral, bastante alterado pelo ser humano e pouco favorável à manutenção de suas populações.

Estudo recente (Garibaldi et al., 2021) com dados coletados durante três anos em áreas agrícolas e entorno com habitats naturais ou seminaturais revelou que, no Brasil, as abelhas africanizadas (*A. mellifera*) são a espécie dominante em ambos os ambientes, causando impactos negativos não somente na abundância e riqueza de

espécies de abelhas nativas, mas na abundância geral de abelhas. Um futuro nada promissor para uma agricultura que cada vez mais depende de polinizadores. Diante das fragilidades do modelo agrícola dominante perante o cenário das mudanças climáticas e o contexto da perda de biodiversidade, o desafio posto para a pesquisa e para a sociedade é validar sistemas e estratégias produtivas sustentáveis que, entre outros aspectos, contribuam para a conservação e restauração da diversidade com abundância de polinizadores silvestres e de suas interações.

O papel das abelhas-sem-ferrão como polinizadores em cultivos agrícolas já foi confirmado para dezenas de culturas ao redor do mundo (Heard, 1999; Slaa et al. 2006; Ramirez et al., 2018; Osterman et al., 2021). Porém, seu manejo para a polinização ainda é muito incipiente (Osterman et al., 2021). No Brasil, restringe-se basicamente a uma pequena parte dos produtores de morango (Antunes et al., 2007; Malagodi-Braga, 2018) e, mais recentemente, em cultivos de café arábica, na região Sudeste, e açaí, na Amazônia (Bezerra et al., 2020). Em outros países, elas são usadas para a polinização em pomares de manga e macadâmia (Fajardo et al., 2008; Heard, 2016). Os principais motivos para a não adoção pelo setor produtivo é a falta de informações específicas para os agricultores e técnicos da extensão rural, a dificuldade de acesso às colônias e a limitação dos estudos à esfera acadêmica. Seu uso em cultivos protegidos também foi razoavelmente estudado pela academia (Osterman et al., 2021); contudo, ainda não é amplamente utilizado, porque a maioria das tentativas são frustradas por causa das dificuldades de adaptação das colônias nesses ambientes. Pesquisas futuras nessa área devem focar no manejo de abelhas-sem-ferrão em ambientes agrícolas realísticos, incluindo o efeito do serviço ecossistêmico da polinização em conjunto com o manejo de polinizadores (Campbell et al., 2018). Além disso, devem focar na avaliação de desempenho, tanto no incremento da produtividade quanto na melhoria de outros atributos dos cultivos, como qualidade, nutrientes e tempo de prateleira (Vanbergen et al., 2020). É importante que esses avanços sejam acompanhados de ações de comunicação e capacitação de técnicos e agricultores, para que o setor produtivo incorpore os conhecimentos gerados pela ciência.

## EFEITOS DE AGROTÓXICOS SOBRE AS ABELHAS-SEM-FERRÃO

Quando se pensa na criação ou no manejo de abelhas para a polinização, a possibilidade dessas abelhas utilizarem recursos vegetais contaminados com substâncias tóxicas deve ser uma preocupação. Trata-se de um cuidado essencial para a conservação e a saúde dos polinizadores, para a viabilidade da criação das abelhas-sem-ferrão e solitárias e, ainda, para o sucesso na polinização e para a comercialização dos produtos das abelhas. Na proximidade de cultivos com uso de agrotóxicos, por exemplo, o mel, o pólen e a própolis poderão apresentar contaminação por esses produtos. O uso

de produtos químicos pela agricultura também pode impactar as abelhas silvestres que ocorrem naturalmente na área ou em suas proximidades. Por isso, esse assunto se tornou de extrema relevância nos últimos anos.

Apesar da importância das abelhas-sem-ferrão como polinizadores de cultivos agrícolas em ambientes tropicais e subtropicais, o modelo utilizado mundialmente para a avaliação de risco de inseticidas é a abelha *A. mellifera*. Uma parte das rotas de exposição, incluindo o pólen e o néctar, por exemplo, são similares entre *A. mellifera* e as abelhas-sem-ferrão. Contudo, algumas rotas não estão contempladas pelos atuais métodos, em função das diferenças na biologia dessas abelhas, e ainda há muitas lacunas no conhecimento básico do grupo Meliponini (Cham et al., 2017; Cham et al., 2019). É preciso ampliar esse conhecimento para as espécies candidatas a modelos experimentais, com estimativas de consumo de néctar e pólen, considerando a coleta de barro, resinas e água, além de desenvolver protocolos adequadas para a avaliação dos efeitos dos agrotóxicos em abelhas nativas, como as abelhas-sem-ferrão (Cham et al., 2017; Cham et al., 2019).

Mais recentemente, na busca por preencher essas lacunas de conhecimento, a pesquisa vem revelando que as avaliações feitas com *A. mellifera* podem não servir como modelo para outras abelhas. Os resultados desses estudos têm demonstrado, por exemplo, que as abelhas-sem-ferrão podem apresentar uma maior suscetibilidade aos agrotóxicos (Moraes et al., 2000; Dorneles et al., 2017) e alterações em seu comportamento, impactando negativamente sua atividade nas flores (Jacob et al., 2019). Moraes et al. (2000) verificaram que quanto maior a relação entre a superfície e o volume corporal da abelha, maior será a sua suscetibilidade ao efeito tóxico do inseticida. Em seus resultados, as abelhas de menor porte, como a iraiá (*N. testaceicornis*) e a jataí (*T. angustula*), mostraram-se mais suscetíveis a um mesmo produto que abelhas de maior porte, como a tubiba (*Scaptotrigona tubiba*).

Além disso, estudos têm revelado que doses não letais (subletais) de inseticidas também podem causar danos às abelhas sociais, com perdas econômicas para os criadores (Thompson, 2003). Agrotóxicos não inseticidas, como o glifosato, herbicida de amplo uso no Brasil e no mundo, podem prejudicar as abelhas (Balbuena et al., 2015). Fungicidas e bactericidas, que anteriormente não eram uma grande preocupação em relação aos riscos para polinizadores, também causam danos à saúde das abelhas sociais (Pettis et al., 2013), possivelmente por prejudicar microrganismos benéficos que vivem nas colônias e são essenciais para sua sobrevivência (De Paula et al., 2021). Investimentos nessa área de pesquisa são fundamentais para a continuidade desses estudos e para preencher as lacunas de conhecimento. Os agrotóxicos utilizados em áreas urbanas também representam um risco para a meliponicultura ali desenvolvida. A tendência é que esses conflitos aumentem à medida que a atividade se expande, exigindo soluções para as quais a pesquisa pode contribuir.

Em virtude desse contexto, o Brasil vem promovendo ações para lidar com os conflitos entre o uso de agrotóxicos e polinizadores. Em nível nacional, desde 2012, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama) tem empregado esforços nessa direção, como restrições de uso de determinados produtos e reavaliação de ingredientes ativos que representam risco aos polinizadores (para um histórico completo das ações e atualização do processo de reavaliação, ver Ibama, 2021). Em nível regional, alguns estados também têm implementado medidas para reduzir os casos de mortalidade de abelhas por agrotóxicos. Destaca-se, nesse contexto, o esforço da Defesa Agropecuária do Estado de São Paulo no sentido de apoiar os apicultores e meliponicultores. Qualquer episódio de mortandade de colônias no estado deve ser comunicado imediatamente à Coordenadoria de Defesa Agropecuária (CDA), que irá assessorar o criador na análise da ocorrência e autuação dos responsáveis (mais informações no site da Defesa Agropecuária de São Paulo).

Do mesmo modo, a iniciativa privada e as organizações não governamentais têm se mobilizado para melhorar a convivência da agricultura com as abelhas. Nos últimos anos, surgiram diversas campanhas educativas e de conscientização quanto à importância dos polinizadores para a agricultura. Além disso, diversas tecnologias de apoio aos agricultores e criadores de abelhas foram lançadas, como novas soluções biológicas para o controle de pragas e doenças. Também surgiram algumas soluções por meio de prestação de serviços, como aplicativos que auxiliam a comunicação entre agricultores e criadores de abelhas. Gradativamente, a população em geral e agricultores estão se tornando mais conscientes quanto à importância das abelhas e tendo acesso a ferramentas e práticas que contribuem para reduzir os impactos negativos sobre elas.

Por outro lado, o uso de agrotóxicos no Brasil, principalmente dos produtos banidos na União Europeia e em outros países do mundo em função dos impactos na saúde das abelhas, precisa ser revisado de forma célere para atender às recomendações da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) quanto à necessidade premente de modelos e sistemas agrícolas que considerem a conservação dos polinizadores em suas práticas. Um exemplo é o caso da proibição do uso do ingrediente ativo fipronil na Europa que, no Brasil, também foi identificado como o principal responsável pela elevada mortalidade de abelhas em diversos estados. Recentemente, o Ibama, como medida cautelar, impôs uma restrição ao uso do fipronil (Ibama, 2024), embora os resultados das pesquisas apontem para a necessidade da proibição de uso, visando a proteção das abelhas.

A convivência harmônica entre a agricultura e os polinizadores é extremamente necessária e será benéfica para toda a sociedade, inclusive para o próprio agronegócio. Ela permitirá ampliar a produtividade dos cultivos por meio da polinização, agregar valor às cadeias produtivas existentes, promover a integração dos sistemas de cultivo

e de criação de abelhas, gerar novos segmentos de mercado e, ao mesmo tempo, conservar a biodiversidade brasileira.

Um grande desafio posto para a pesquisa agropecuária associada aos polinizadores e aos agrotóxicos é gerar resultados que promovam e estimulem a adoção de sistemas agrícolas inovadores que, ao produzirem com a natureza, dependam menos de insumos externos e sejam capazes de recuperar, restaurar e manter boa parte dos processos naturais e dos serviços ambientais dos quais a agricultura depende, como a polinização. Para isso será fundamental reconhecer e consolidar as contribuições da agroecologia (CAISAN, 2012) e das agroflorestas (Bhagwat et al., 2008) no alcance desses objetivos e contar com o engajamento das instituições de ensino, pesquisa e extensão, do setor público e da iniciativa privada.

## SAÚDE DAS ABELHAS-SEM-FERRÃO

Para uma meliponicultura sustentável, os meliponicultores precisam considerar que a qualidade do ambiente irá impactar diretamente a saúde desses insetos e, conseqüentemente, o desenvolvimento da atividade (FAO et al., 2021). A riqueza da vegetação no entorno da criação é crucial, porque as abelhas devem ser capazes de encontrar recursos nutricionais vitais (néctar, pólen, água, resinas etc.), e estes devem estar disponíveis em diversidade, qualidade e quantidade suficientes ao longo de sua vida para garantir sua sobrevivência e reprodução. Déficit nutricionais e exposição a pesticidas aumentam a suscetibilidade das abelhas aos patógenos, tornando-as mais propensas a doenças (Pettis et al, 2013; FAO et al., 2021). Essa temática demanda estudos em relação às abelhas-sem-ferrão (Cham et al., 2019).

Uma maior suscetibilidade às doenças pode estar associada ao impacto de agrotóxicos e de outros fatores na microbiota presente tanto no organismo das abelhas-sem-ferrão quanto no interior de suas colônias. A microbiota associada aos organismos vivos, em geral, pode ser rapidamente alterada por fatores externos, como dieta, estresse e produtos químicos, como medicamentos e agrotóxicos. Uma alteração na microbiota pode tornar animais e plantas mais suscetíveis às doenças. Diversos estudos têm mostrado que as abelhas-sem-ferrão não sobreviveriam sem algumas espécies de bactérias e fungos comumente presentes em seus ninhos (Machado, 1971; Menezes et al., 2015). Uma bactéria recentemente encontrada em abelhas adultas, células de cria e materiais de ninho de colônias de abelhas-sem-ferrão, o actinomiceto *Streptomyces* (Promnuan et al., 2009; Cambroner-Heinrichs et al., 2019; De Paula et al., 2021), é bem conhecida por secretar antibióticos (Kroiss et al., 2010). Contudo, pouco se sabe sobre a diversidade da comunidade microbiana associada às abelhas-sem-ferrão, sua relação com a inibição de patógenos e o impacto dos agrotóxicos sobre essa comuni-

dade (De Paula et al., 2021). Sem dúvida, um campo de pesquisa importante para a sustentabilidade da meliponicultura.

À medida que a meliponicultura se desenvolve, os problemas com doenças, parasitas e pragas podem se tornar mais frequentes. A principal preocupação dos criadores são os forídeos, mosquinhos ligeiros que depositam seus ovos nos potes de pólen e podem destruir uma colônia em pouco tempo (Oliveira et al., 2013). Porém, já conhecemos uma diversidade razoável de bactérias, fungos, vírus, ácaros, insetos e outros macro-organismos que podem prejudicar as colônias de abelhas-sem-ferrão (Nunes-Silva, 2018). Novos registros têm sido relatados (Teixeira et al., 2020) e algumas ocorrências, com causas desconhecidas, estão sob investigação (Díaz et al., 2017; Caesar et al., 2019).

A disseminação de doenças pode ocorrer entre as abelhas manejadas e das manejadas para as silvestres. É um assunto relevante porque, além de impactar o setor produtivo, pode afetar as populações naturais, sendo apontado como uma das causas de declínio de polinizadores (Goulson et al., 2015; Potts et al., 2016b; Aizen et al., 2020; Garibaldi et al., 2021; Martínez-López et al., 2021; Nanetti et al., 2021). Por isso, é importante que os meliponicultores relatem ocorrências de problemas e mortalidade de colônias aos órgãos de defesa agropecuária, contribuindo no monitoramento e na contenção de pragas e doenças e na investigação dos casos de contaminação por agentes químicos. Além disso, a adoção de boas práticas de manejo e de transporte é fundamental para evitar que problemas como esses se tornem cada vez mais frequentes (Vollet-Neto; Menezes, 2018).

Outra preocupação relacionada ao transporte de polinizadores é o risco de espécies introduzidas, em locais onde não ocorrem naturalmente, se estabelecerem no ambiente natural ou se tornarem invasoras (Aizen et al., 2020). Ao longo das últimas décadas, diversas espécies de abelhas-sem-ferrão foram transportadas e multiplicadas fora da sua área de ocorrência natural. A princípio, essas introduções ocorreram para a realização de estudos científicos sobre endocruzamento (Carvalho, 2001; Nogueira-Neto, 2002) e, posteriormente, para fins de criação (Vollet-Neto e Menezes, 2018; Graf et al., 2020). Atualmente, diversos meliponicultores da região Sul e Sudeste mantêm colônias de espécies que não pertencem à fauna local, sem, contudo, realizar estudos sobre possíveis impactos nas populações naturais. Um estudo recente, que registrou pela primeira vez a ocorrência de *Melipona scutellaris* na região metropolitana de Curitiba, PR, não encontrou indícios de alteração na estrutura da comunidade de abelhas nativas do ambiente urbano estudado e classificou-a como uma espécie não nativa casual (Graf et al., 2020). Por outro lado, outros estudos apontam que pode haver uma hibridização dessa abelha com a *Melipona capixaba*, uma espécie ameaçada de extinção com distribuição restrita no Espírito Santo e, dessa forma, ameaçar a conservação das suas populações naturais (Nascimento, 2000; Nogueira et al., 2014; Resende et al., 2014; ICMBio, 2018).

Existe a possibilidade dessas introduções beneficiarem o ser humano e não impactarem as populações naturais (Byatt et al., 2016; Russo, 2016). Contudo, os impactos negativos ao redor do mundo são frequentes e as consequências desse tipo de atitude podem ser prejudiciais para as populações naturais, como estudos científicos recentes têm alertado (Nascimento et al., 2000; Resende et al., 2014; Graf et al., 2020; Aizen et al., 2020; Garibaldi et al., 2021; Martínez-López et al., 2021; Nanetti et al., 2021). Espécies que não pertencem à fauna de um determinado local podem competir por recursos e nichos ecológicos (alimento, local de nidificação, materiais de construção), hibridizar com espécies e subespécies próximas, promover a perda de variação genética intraespecífica, introduzir doenças, pragas e parasitas e disseminá-las para populações silvestres (Francisco et al., 2014; Resende et al., 2014; Byatt et al., 2016; Vollet-Neto; Menezes, 2018; Jaffé et al., 2016; Jaffé et al., 2019; Aizen et al., 2020; Des Roches et al., 2021). Avaliações e estudos sobre os possíveis impactos dessas introduções em abelhas-sem-ferrão são escassos. Dessa forma, as avaliações de risco para futuras introduções de abelhas em locais onde não ocorrem naturalmente ou mesmo para a liberação das criações já existentes precisam ser realizadas caso a caso e intensificadas pelos órgãos públicos e instituições de pesquisa, para que as decisões futuras sejam embasadas em ciência.

A competição com abelhas exóticas também foi apontada como uma das causas de declínio de polinizadores (Potts et al., 2016a). Cane e Tepedino (2017) estimam que um apiário com 40 colônias pode coletar uma quantidade de pólen equivalente a 4 milhões de provisões de alimento larval de espécies de abelhas solitárias, tendo assim uma grande influência no compartilhamento dos recursos com outras abelhas. Segundo Valido et al. (2019), a presença da *A. mellifera* pode reduzir a diversidade dos polinizadores nativos e causar um impacto negativo em suas interações. Esses fatores precisam ser levados em consideração para que o avanço da apicultura seja compatível com a conservação dos polinizadores nativos.

## REGULAMENTAÇÃO DA MELIPONICULTURA

Como animais silvestres, as abelhas-sem-ferrão são parte integrante da fauna brasileira e, portanto, fazem parte dos recursos naturais brasileiros, como a água, a flora, o solo etc. Dessa forma, sua criação, considerando a autorização para o uso de recursos naturais, e a fiscalização, monitoramento e controle ambiental estão sob a responsabilidade do Ibama.

O primeiro aparato regulatório específico para a atividade de criação desse grupo de abelhas foi a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), nº 346, de 16 de agosto de 2004. Mesmo tendo caráter inovador, estabeleceu alguns requisitos que, na prática, limitavam o desenvolvimento da atividade. Além disso, os meliponicultores não conseguiam se regularizar em função da falta de normas es-

pecíficas para a regulamentação da atividade e excesso de burocracia. Por isso, essa resolução foi recentemente revisada pelo Conama, dando lugar para a Resolução nº 496, de 19 de agosto de 2020, com regras e procedimentos mais claros, apesar de ainda apresentar gargalos para o desenvolvimento da atividade. A atribuição relativa à autorização para uso e manejo das abelhas-sem-ferrão, antes exclusiva do Ibama, a partir de 2011 passou a ser exercida de forma colaborativa pela União, estados, Distrito Federal e municípios (Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011). Atualmente, as autorizações são concedidas pelas secretarias estaduais de meio ambiente.

A partir dessa abertura dada pela LC nº 140/2011, vários estados buscaram criar seus regramentos em relação à prática da criação das abelhas-sem-ferrão. Alguns a partir de atos administrativos de secretarias de Governo (RS, MA, AM, SP), outros por meio de processos conduzidos no âmbito do poder legislativo estadual (SC, PR, BA, GO, ES). Em alguns estados, o processo foi simplificado e desburocratizado, como no Paraná. Em outros, ainda é bastante complexo regularizar a criação, como em São Paulo e Goiás, e há estados sem normas específicas.

Na prática, vários fatores ainda travam e dificultam a regularização da atividade, seja pelo enquadramento em regulamentos já existentes e idealizados para outros animais silvestres, desconsiderando-se, assim, as características diferenciadas da meliponicultura, seja pelo excesso de procedimentos autorizativos burocráticos. Dessa forma, tais procedimentos muitas vezes não se alinham com a dinâmica da prática e condução zootécnica que a atividade adquiriu em seu processo de desenvolvimento.

Outros aspectos importantes, e não devidamente considerados, foram a diversidade sociocultural associada à meliponicultura, inclusive dos povos indígenas, as particularidades regionais e a complexidade dos cadastros em ambientes informatizados exigidos para o registro da atividade. Muitos desses cadastros estão disponíveis apenas em plataformas complexas, exigindo um conhecimento avançado da linguagem digital, afastando o criador mais tradicional e aquele localizado em regiões onde o acesso à internet de qualidade não é uma realidade. Esses gargalos afastaram o público-alvo do ambiente legalizado, mantendo a informalidade e a clandestinidade ainda muito presentes na atividade.

Além do aspecto ambiental no processo de regularização da atividade, a meliponicultura também está subordinada ao Ministério da Agricultura e Pecuária, por meio da Secretaria de Defesa Agropecuária. Durante muito tempo, essa relação foi pouco considerada em função da pequena expressão da atividade. Porém, alguns estados começaram a se organizar para registrar os criadores nos seus respectivos departamentos de defesa agropecuária. Essa mudança vem acontecendo em função de uma série de motivos, como os episódios recorrentes de mortalidade de abelhas por agrotóxicos, casos recentes de doenças em colônias de abelhas-sem-ferrão e crescimento do interesse da população pela meliponicultura.

Se por um lado esse registro gera benefícios ao setor produtivo, como melhor dimensionamento do tamanho da atividade e apoio das instituições públicas ao segmento; por outro, pode gerar mais burocracia. No estado de São Paulo, por exemplo, o meliponicultor precisa se registrar tanto na Secretaria Estadual de Meio Ambiente, por meio do Sistema Integrado de Gestão de Fauna Silvestre (Gefau), quanto na Secretaria Estadual de Agricultura, por meio da Gestão de Defesa Animal e Vegetal (Gedave), independentemente do tamanho da sua criação ou da sua finalidade (Resolução SIMA nº II, de 3 de fevereiro de 2020; Resolução SAA nº 41, de 2 de outubro de 2019). Assim, quem tem uma única colônia precisa passar por um longo processo burocrático para se regularizar, desestimulando as pessoas interessadas.

Uma solução interessante foi a encontrada pelo estado do Paraná, por meio da proposição e articulação da Câmara Técnica de Meliponicultura do Paraná (CTM-PR), com os órgãos competentes, que unificou os registros, visando à desburocratização do processo (Portaria IAP nº 6, de 17 de janeiro de 2019). Todo meliponicultor do Paraná deve se cadastrar no Sistema de Defesa Sanitária Animal (SDSA). O Instituto Água e Terra do Paraná (IAT, antes IAP), em conjunto com a Agência de Defesa Agropecuária do Paraná (Adapar), compartilha os dados dos criadores constantes no SDSA, para fins de fiscalização e controle de fauna.

Atualmente, está em curso o processo de tramitação de projetos de leis no âmbito federal para estabelecer uma base referencial para a prática da atividade no país. Nesse processo, pretende-se que sejam incorporados aspectos importantes, como o enfoque zootécnico que a atividade pode exercer, com compartilhamento de responsabilidades no cadastramento e fiscalização da atividade entre os órgãos ambientais e aqueles ligados à agricultura, a simplificação do registro dos criadores e meliponários, o estabelecimento de ações de fomento à atividade e a criação de banco de dados estatísticos com compartilhamento das informações entre os órgãos competentes.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo e a criação de abelhas-sem-ferrão ganha cada vez mais destaque e popularidade entre os consumidores em geral. A versatilidade de uso das abelhas e sua importância ecológica e econômica torna esses insetos cada vez mais importantes. Diversos avanços vêm sendo conquistados; porém, ainda nos deparamos com vários desafios a serem superados para a sustentabilidade da atividade e uma melhor convivência com as abelhas nativas e com a natureza que as mantém.

Ainda temos muito a conhecer sobre nossas abelhas-sem-ferrão. As dificuldades na identificação taxonômica e as lacunas no conhecimento básico ainda são entraves a serem solucionados. As questões relativas às interações entre microrganismos e abelhas, apresentadas anteriormente, são oportunidades para a descoberta de novos

produtos e processos com aplicações diversas, bem como para uma melhor compreensão da saúde de suas colônias.

A ausência de padronização nos métodos e materiais utilizados na meliponicultura é apontada como um obstáculo para a expansão da atividade. No caso das abelhas-sem-ferrão, é possível estabelecer um padrão que se mostre mais adequado para cada espécie ou grupo de espécies e que seja de fácil adoção pelos meliponicultores.

Em relação à polinização agrícola, um importante desafio será estabelecer protocolos de boas práticas que garantam, além de melhorias na produtividade e qualidade das colheitas, a saúde e o bem-estar das abelhas manejadas e das abelhas silvestres, de modo a potencializar os resultados esperados. Além de ampliar o conhecimento sobre o papel e os requisitos de polinização em diferentes cultivos e ambientes, a pesquisa pode contribuir com a ampliação na adoção de sistemas e estratégias sustentáveis de produção, que colaborem para a conservação e restauração da diversidade e da abundância de polinizadores silvestres, bem como das espécies manejadas. A melhoria na qualidade ambiental das propriedades agrícolas será fundamental não apenas para garantir a polinização, mas para criar condições mais favoráveis ao enfrentamento das crises que cada vez mais se acentuam: a climática, a hídrica e a da biodiversidade.

Uma outra preocupação diz respeito às limitações de crescimento da escala de produção de colônias de abelhas, devido principalmente à carência de recursos alimentares. Uma das soluções apontadas para a falta de colônias de abelhas foi o estabelecimento de pequenas estruturas de produção que atuem em conjunto. Contudo, o próprio desenvolvimento da atividade, com o aumento de criadores e melhoria da condição técnica das criações, poderá contribuir diretamente para que se tenha uma maior quantidade de colônias em condições de atender às demandas crescentes por serviços de polinização e maior disponibilidade dos produtos das abelhas. Outras soluções inovadoras devem surgir da parceria entre o setor produtivo e a academia para superar esse obstáculo.

Alguns desafios práticos adicionais incluem a necessidade de simplificação de processos de registro da atividade, atualmente muito burocráticos, como cadastro de colônias, procedimentos de transporte de abelhas e comercialização de seus produtos. Dessa forma, a integração entre academia, setor produtivo, entidades de classe e órgãos públicos é o melhor caminho para a superação dos desafios para a conservação e o manejo sustentável das abelhas-sem-ferrão e para a expansão e fortalecimento da meliponicultura em nosso país.

## REFERÊNCIAS

ANTUNES, O. T.; CALVETE, E. O.; ROCHA, H. C.; NIENOW, A. A.; CECCHETTI, D.; RIVA, E.; MARAN, R. E. Produção de cultivares de morangueiro polinizadas pela abelha jataí em ambiente protegido. *Horticultura Brasileira*, v. 25, n. 1, p. 94-99, 2007.

ADAB. Agência Estadual de Defesa Agropecuária da Bahia. Portaria ADAB nº. 207, de 21 de novembro de 2014. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=277684>. Acesso em: 18 de set. 2021.

ADAF. Agência de Defesa Agropecuária e Florestal do Estado do Amazonas. Portaria ADAF nº 253, de 31 de outubro de 2016. Disponível em: <http://www.adaf.am.gov.br/wp-content/uploads/2021/05/PORTARIA-253.2016.pdf>. Acesso em: 18 set. 2021.

ADAPAR. Agência de Defesa Agropecuária do Paraná. Portaria nº 63, de 10 de março de 2017. Disponível em: [https://www.adapar.pr.gov.br/sites/adapar/arquivos\\_restritos/files/documento/2020-10/63\\_17.pdf](https://www.adapar.pr.gov.br/sites/adapar/arquivos_restritos/files/documento/2020-10/63_17.pdf). Acesso em: 18 set. 2021.

ADLER, L. S. The ecological significance of toxic nectar. *Oikos*, v. 91, p. 409-420, Apr. 2003. DOI: <https://dx.doi.org/10.1034/j.1600-0706.2000.910301.x>.

AIZEN, M. A.; ARBETMAN, M. P.; CHACOFF, N. P.; CHALCOFF, V. R.; FEINSIGER, P.; GARIBALDI, L. A.; HARDER, L. D.; MORALES, C. L.; SÁEZ, A.; VANBERGERN, A. H. Chapter Two – Invasive bees and their impact on agriculture. *Advances in Ecological Research*. v. 63, p. 49-92, Sept. 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/bs.aecr.2020.08.001>.

ALEIXO, K. P.; MENEZES, C.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L.; DA SILVA, C. I. Seasonal availability of floral resources and ambient temperature shape stingless bee foraging behavior (*Scaptotrigona aff. depilis*). *Apidologie*, v. 48, p. 117-127, Feb. 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s13592-016-0456-4>.

ALVES, J.E. Toxidade do nim (*Azadirachta indica* A. Juss.: Meliaceae) para *Apis mellifera* e sua importância apícola na caatinga e mata litorânea cearense. 2010. 141 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Departamento de Zootecnia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

ALVES, D. A.; MENEZES, C.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L.; WENSELEERS, T. First discovery of a rare polygyne colony in the stingless bee *Melipona quadrifasciata* (Apidae, Meliponini). *Apidologie*, v. 42, p. 211-213, May 2011.

ARNOLD, N.; ZEPEDA, R.; VÁSQUEZ-DÁVILA, M.; ALDASORO- MAYA, M. Las abejas sin aguijón y su cultivo em Oaxaca, México y Catálogo de especies. San Cristóbal de las Casas: Ecosur-Conabio, 2018. 147 + 46 p.

BALBUENA, M. S.; TISON, L.; HAHN, M.; GREGGERS, U.; MENZEL, R.; FARINA, W. M. Effects of sublethal doses of glyphosate on honeybee navigation. *The Journal of Experimental Biology*, v. 218, p. 2799-2805, Sept. 2015.

BAPTISTELA, A. R.; SOUZA, C.; WEYDER, C.; SANTANA, W. C.; SOARES, E.; SOARES, E. Techniques for the In vitro production of queens in stingless bees (Apidae, Meliponini). *Sociobiology*, v. 59, n. 1, p. 297-310, Jan. 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.13102/sociobiology.v59i1.685>.

BHAGWAT, S. A.; WILLS, K.J.; BIRKS, H.J.B.; WHITTAKER, R.J. Agroforestry: a refuge for tropical biodiversity? *Trends in Ecology and Evolution*, v. 23, n. 5, p. 261–267, Jun. 2008. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2008.01.005>.

BONAMIGO, T.; CAMPOS, J. F.; ALFREDO, T. M.; BALESTIERI, J. B. P.; CARDOSO, C. A. L.; PAREDES-GAMERO, E. J.; SOUZA, K. P.; SANTOS, E. L. Antioxidant, cytotoxic, and toxic activities of propolis from two native bees in Brazil: *Scaptotrigona depilis* and *Melipona quadrifasciata anthidioides*. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, v. 4, p. 1–12, Jan. 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1155/2017/1038153>.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Abastecimento. **Instrução normativa MAPA/DIPOA nº II, de 20 de outubro de 2000**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/suasa/regulamentos-tecnicos-de-identidade-e-qualidade-de-produtos-de-origem-animal-1/IN11de2000.pdf>. Acesso em: 18 set. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução MMA/CONAMA nº 346, de 16 de agosto de 2004**. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=448>. Acesso em: 18 set. 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução MMA/CONAMA nº 496, de 19 de agosto de 2020**. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=20/08/2020&jornal=515&pagina=91>. Acesso em: 19 set. 2021.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011**. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LCP&numero=140&ano=2011&ato=bbdITSqtUMVpWTdf5>. Acesso em: 18 set. 2021.

BYATT, M.; CHAPMAN, N.C.; LATTY, T.; OLDROYD, B.P. The genetic consequences of the anthropogenic movement of social bees. *Insectes Sociaux*, v. 63, p. 15–24, Nov. 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s00040-015-0441-3>.

CAISAN. Câmara Interministerial de Segurança Alimentar e Nutricional. Conselho de Direitos Humanos. Décima sexta sessão. Item 3 da agenda Promoção e proteção de todos os direitos humanos, direitos civis, políticos, econômicos, sociais e culturais, inclusive o direito ao desenvolvimento. **Relatório apresentado pelo Relator Especial sobre direito à alimentação, Olivier de Schutter**. Brasília, DF: MDS, 2012. Disponível em: [https://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/seguranca\\_alimentar/cadernoi\\_sisan2012.pdf](https://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/seguranca_alimentar/cadernoi_sisan2012.pdf). Acesso em: 19 out. 2021.

CALLIGARIS, I. B.; MALASPINA, O.; BUENO, O. C. Toxicidade do néctar e do pólen de *Spathodea campanulata* (Bignoneaceae) sobre *Scaptotrigona postica* (Hymenoptera: apidae). In: ENCONTRO SOBRE ABELHAS, 5., 2002, Ribeirão Preto. *Anais*. Ribeirão Preto: Funpec, 2002. p. 347–347.

CAMARGO, J.M.F.; POSEY, D.A. O Conhecimento dos Kayapós sobre as abelhas sociais sem ferrão (Meliponidae, Apidae, Hymenoptera): Notas adicionais. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, v. 6, n. 1, 1990.

CAMARGO, R. C., R. de; OLIVEIRA, K. L.; BERTO, M.I. Mel de abelhas-sem-ferrão: proposta de regulamentação Stingless bee honey: technical regulation proposal. *Brazilian Journal of food technology*. Short Communication Campinas, v. 20, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/1981-6723.15716>.

CAMBRONERO-HEINRICH, J. C.; MATARRITA-CARRANZA, B.; MURILLO-CRUZ, C.; ARAYVALVERDE, E.; CHAVARRÍA, M.; PINTO-TOMÁS, A. A. Phylogenetic analyses of antibiotic-producing

*Streptomyces* sp. isolates obtained from the stingless-bee *Tetragonisca angustula* (Apidae: Meliponini). **Microbiology**, v. 165, p. 292-301, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.1099/mic.o.000754>.

CAMPBELL, A.J.; CARVALHEIRO, L.G.; MAUÉS, M.M.; JAFFÉ, R.; GIANNINI, T.C.; FREITAS, M.A.B.; COELHO, B.W.T.; MENEZES, C. Anthropogenic disturbance of tropical forests threatens pollination services to açai palm in the Amazon river delta. **Journal of Applied Ecology**, v. 55, n. 4, p. 1725-1736. Jan. 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/1365-2664.13086>.

BEZERRA, L.A.; CAMPBELL, A.J.; BRITO, T.F.; MENEZES, C.; MAUÉS, M.M. Pollen loads of flower visitors to açai palm (*Euterpe oleracea*) and implications for management of pollination services. **Neotropical Entomology**, v. 49, n. 4, p. 482-490. Jul. 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s13744-020-00790-x>.

CANE, J. H., TEPEDINO, V. J. Gauging the effect of honey bee pollen collection on native bee communities. **Conservation Letters**, v. 10, n. 2, p. 205-210. 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/conl.12263>.

CAPPAS-E-SOUZA, J.P. Os Maias e a Meliponicultura. **Apicultor**, v. 3, n. 9, p. 15-17, 1995.

CARDOZO, D. V.; MOKOCHINSKI, J. B.; MACHADO, C. S.; SAWAYA, A. C. H. F.; CAETANO, I. K.; FELSNER, M. L.; TORRES, Y. R. Variabilidade química de geoprópolis produzida pelas abelhas-sem-ferrão Jataí, Mandaçaia e Manduri. **Revista Virtual de Química**. v. 7, n. 6, p. 2457-2474, Sept. 2015.

CARVALHEIRO, L. G.; SEYMOUR, C. L.; VELDTMAN, R.; NICOLSON, S. W. Pollination services decline with distance from natural habitat even in biodiversity-rich areas. **Journal of Applied Ecology**, v. 47, n. 4, p. 810-820, Aug. 2010. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01829.x>.

CARVALHO, G.A. The number of sex alleles (CSD) in a bee population and its practical importance (Hymenoptera, Apidae) **Jour. Hymenop. Research**, 10 (1): 10- 15, 2001.

CARVALHO, A. C. P.; MESSAGE, D. A scientific note on the toxic pollen of *Stryphnodendron polyphyllum* (Fabaceae, Mimosoideae) which causes sacbrood-like symptoms. **Apidologie**, v. 35, n. 1, Feb. 2004. DOI: <https://dx.doi.org/10.1051/apido:2003059>.

CARVALHO, C.A.L.; SOUZA, B.A.; SODRÉ, G.S.; MARCHINI, L.C.; ALVES, R.M. **O Mel de abelhas-sem-ferrão: contribuição para a caracterização físico-química**. Cruz das Almas: Universidade Federal da Bahia/SEAGRI-BA, 2005. 32 p.: il. (Série Meliponicultura; 4)

CAESAR, L.; CIBULSKI, S.P.; CANAL, C.W.; BLOCHTEIN, B.; SATTTLER, A.; HAAG, K.L. The virome of an endangered stingless bee suffering from annual mortality in southern Brazil. **Journal of General Virology**, v. 100, n. 7, p. 1153-1164, Jul 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.1099/jgv.0.001273>.

CHAM, K.O.; REBELO, R.M.; OLIVEIRA, R.P.; FERRO, A.A.; SILVA, F.E.C.V.; BORGES, L.O.; SARETTO, C.O.S.D.; TONELLI, C.A.M.; MACEDO, T.C. **Manual de avaliação de risco ambiental de agrotóxicos para abelhas**. Brasília: Ibama, 2017, 105 p.

CHAM, K.O.; NOCELLI, R.C.F.; BORGES, L.O.; VIANA-SILVA, F.E.C.; TONELLI, C.A.M.; MALASPINA, O.; MENEZES, C.; ROSA-FONTANA, A.S.; BLOCHTEIN, B.; FREITAS, B.M.; PIRES, C.S.S.; OLIVEIRA, F.F.; CONTRERA, F.A.L.; TOREZANI, K.R.S.; RIBEIRO, M.F.; SIQUEIRA, M.A.L.; ROCHA, M.C.L.S.A. Pesticide Exposure Assessment Paradigm for Stingless Bees. **Environmental Entomology**, v. 48, p. 36-48, Feb. 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.1093/ee/nvy137>.

CINTRA, P.; MALASPINA, O.; BUENO, O. C. Plantas tóxicas para abelhas. **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 72, n. 4, Dez. 2005. Disponível em: [http://www.biologico.sp.gov.br/uploads/docs/arq/v72\\_4/cintra.PDF](http://www.biologico.sp.gov.br/uploads/docs/arq/v72_4/cintra.PDF). Acesso em: 3 jul. 2021.

CRANE, E. The past and present status of beekeeping with stingless bees. **Bee World**, v. 73, p. 29-42, 1992. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/0005772X.1992.11099110>.

CONTRERA, F. A. L.; MENEZES, C.; VENTURIERI, G. C. New horizons on stingless beekeeping (Apidae, Meliponini). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, p. 48-51, Jan. 2011.

CONTRERA, F. A. L.; CORDEIRO, H. K. C.; TEIXEIRA, J. C. S.; LEÃO, K. L.; VEIGA, J. C.; MENEZES, C. A scientific note on the use of external feeders for the Amazonian stingless bee *Melipona flavolineata* (Apidae, Meliponini). **Journal of Apicultural Research**, v. 54, n. 2, p. 77-80, Jan. 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/00218839.2015.1109918>.

CORTOPASSI-LAURINO, M.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L.; ROUBIK, D. W.; DOLLIN, A.; HEARD, T.; AGUILAR, I.; VENTURIERI, G. C.; EARDLEY, C.; NOGUEIRA-NETO, P. Global meliponiculture: challenges and opportunities. **Apidologie**, v. 37, n. 3, p. 275-292, June 2006. DOI: <https://dx.doi.org/10.1051/apido:2006027>.

CORTOPASSI-LAURINO, M.; RAMALHO, M. Pollen harvest by africanized *Apis mellifera* and *Trigona spinipes* in São Paulo: botanical and ecological views. **Apidologie**, v. 11, n. 4, p. 314-350, 1988.

COSTA, L.; VENTURIERI, G. C. Diet impacts on *Melipona flavolineata* workers (Apidae, Meliponini). **Journal of Apicultural Research**, v. 48, p. 38-45, 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.3896/IBRA.1.48.1.09>.

COSTA-NETO, E.M. Folk Taxonomy and Cultural Significance of “Abeia” (Insecta, Hymenoptera) to the Pankararé, Northeastern Bahia State, Brazil. **Journal of Ethnobiology**, v. 18, p. 1-13, 1998.

DE LANDA, D. **Relación de las cosas de Yucatán**. México: Editorial Porrúa, 1566. 252 p.

DE PAULA, G. T.; MENEZES, C.; PUPO, M. T.; ROSA, C. A. Stingless bees and microbial interactions. **Current Opinion in Insect Science**, v. 44, p. 41-47, Apr. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cois.2020.11.006>.

DES ROCHES, S.; PENDLETON, L.H.; SHAPIRO, B.; PALKOVACS, E.P. Conserving intraspecific variation for nature’s contributions to people. **Nature ecology & evolution**, v. 5, p. 574-582, Mar. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/s41559-021-01403-5>.

DÍAZ, S.; URBANO, S.S.; CAESAR, L.; BLOCHTEIN, B.; SATTTLER, A.; ZUGE, V.; HAAG, K.L. Report on the microbiota of *Melipona quadrfasciata* affected by a recurrent disease, **Journal of Invertebrate Pathology**, v. 143, p. 35-39, Feb. 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jip.2016.11.012>.

DORNELES, A. L.; ROSA, A. de S.; BLOCHTEIN, B. Toxicity of organophosphorus pesticides to the stingless bees *Scaptotrigona bipunctata* and *Tetragonisca fiebrigi*. **Apidologie**, v. 48, p. 612-620, Apr. 2017.

DOS SANTOS, L.; HOCHHEIM, S.; BOEDER, A. M.; KROGER, A.; TOMAZZOLI, M. M.; DAL PAI NETO, R.; MARASCHIN, M.; GUEDES, A.; DE CORDOVA, C. M. M. Chemical characterization, antioxidant, cytotoxic and antibacterial activity of propolis extracts and isolated compounds from the Brazilian stingless bees *Melipona quadrfasciata* and *Tetragonisca angustula*. **Journal of Apicultural Research**, v. 56, n. 5, p. 543-558, Sept. 2017.

ENGELS, M.S.; DINGEMANS-BAKELS, F. Nectar and pollen resources for stingless bees (Meliponini, Hymenoptera) in Surinam (South America). *Apidologie*, v. 11, n. 4, p. 314-350, 1980.

FAJARDO JR, A.; MEDINA, J.; OPINA, O.; CERVANCIA, C. Insect pollinators and floral visitors of mango (*Mangifera indica* L. cv. Carabao). *The Philippine Agricultural Scientist*, v. 91, n. 4, 2008.

FAO, IZSLT, APIMONDIA, CAAS. **Good beekeeping practices for sustainable apiculture**. FAO Animal Production and Health Guidelines No. 25. Rome. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.4060/cb5353jen>.

FERREIRA, B. L.; GONZAGA, L. V.; VITALI, L.; MICKE, G. A.; MALTEZ, H. F.; RESSUREIÇÃO, C.; COSTA, A. C. O.; FETT, R. Southern-Brazilian geopropolis: A potential source of polyphenolic compounds and assessment of mineral composition. *Food Research International*, v. 126, 108683, Dec. 2019.

FRANCISCO, F.O.; SANTIAGO, L.R.; BRITO, R.M.O.; OLDROYD, B.P.; ARIAS, M.C. Hybridization and asymmetric introgression between *Tetragonisca angustula* and *Tetragonisca fiebrigi*. *Apidologie*, v. 45, p. 1-9, 2014.

GABRIEL, M. B.; MARA, J.; CARNEIRO, M. J.; DE CAMARGO, R. C. R.; SAWAYA, A. C. H. F. The chemical composition and antioxidant activity of mandaçaia (*Melipona quadrifasciata*) geopropolis varies more due to region than month of collection. *Natural Product Research*, Mar. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/14786419.2021.1892101>.

GARIBALDI, L. A.; STEFFAN-DEWENTWE, I.; KREMEN, C.; MORALES, J. M.; BOMMARCO, R.; CUNNINGHAM, S. A.; CARVALHEIRO, L. G.; CHACOFF, N. P.; DUDENHOFFER, J. H.; GREENLEAF, S. S.; HOLZSCHUH, A.; ISAACS, R.; KREWENKA, K.; MANDELIC, Y.; MAYFELD, M. M.; MORANIN, L. A.; POTTS, S. G.; RICKETTS, T. H.; SZENTGYORGYI, H.; VIANA, B. F.; WESTPHAL, C.; WINFREE, R.; KLEIN, A. M. Stability of pollination services decreases with isolation from natural areas despite honey bee visits. *Ecology Letters*, v. 14, n. 10, p. 1062-1072, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01669.x>.

GARIBALDI, L. A.; STEFFAN-DEWENTER, I.; WINFREE, R.; AIZEN, M. A.; BOMMARCO, R.; CUNNINGHAM, S. A.; KREMEN, C.; CARVALHEIRO, L. G.; HARDER, L. D.; AFIK, O.; BARTOMEUS, I.; BENJAMIN, F.; BOREUX, V.; CARIVEAU, D.; CHACOFF, N. P.; DUDENHÖFFER, J. H.; FREITAS, B. M.; J. GHAZOUL; S. GREENLEAF; HIPÓLITO, J.; HOLZSCHUH, A.; HOWLETT, B.; ISAACS, R.; JAVOREK, S. K.; KENNED, C. M.; KREWENKA, K. M.; KRISHNAN, S.; MANDELIC, Y.; MAYFIELD, M. M.; MOTZKE, I.; MUNYUL, T.; NAULT, B. A.; OTIENO, M.; PETERSEN, J.; PISANTY, G.; POTTS, S. G.; RADER, R.; RICKETTS, T. H.; RUNDLÖF, M.; SEYMOUR, C. L.; SCHÜEPP, C.; SZENTGYÖRGYI, H.; TAKI, H.; TSCHARNTKE, T.; VERGARA, C. H.; VIANA, B. F.; WANGER, T. C.; WESTPHAL, C.; WILLIAMS, N.; KLEIN, A. M. Wild Pollinators Enhance Fruit Set of Crops Regardless of Honey Bee Abundance. *Science*, v. 339, n. 6127, p. 1608-1611, Mar. 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1126/science.1230200>.

GARIBALDI, L. A.; PÉREZ-MENDEZ, N.; CORDEIRO, G. D.; HUGHES, A.; ORR, M.; ALVES-DOS-SANTOS, I.; FREITAS, B. M.; OLIVEIRA, F. F.; LEBUHN, G.; BARTOMEUS, I.; AIZEN, M.; ANDRADE, P.; BLOCHTEIN, B.; BOSCOLO, D.; DRUMOND, P.; GAGLIANONE, M.; GEMMILL-HERREN, B.; HALINSKI, R.; KRUG, C.; MAUES, M.; PIEDADE KIILL, L.; PINHEIRO, M.; PIRES, C.; FELIPE VIANA, B. Negative impacts of dominance on bee communities: Does the influence of invasive honey bees differ from native bees? *Ecology*, Sept. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/ecy.3526>.

GOMES, R. L. C.; MENEZES, C.; CONTRERA, F. A. L. Worker longevity in an Amazonian *Melipona* (Apidae, Meliponini) species: effects of season and age at foraging onset. *Apidologie*, v. 46, p. 133-143, Mar. 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s13592-014-0309-y>.

GONZÁLEZ-ACERETO, J. *Cría y manejo de abejas nativas sin aguijón en México*. Mérida: Planeta Impresores. 2008, 177 p.

GOULSON, D.; NICHOLLS, E.; BOTÍAS, C.; ROTHERAY, E.L. Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science*, v. 347, n. 6229, Mar 2015, DOI: <https://dx.doi.org/10.1126/science.1255957>.

GRAF, L.V.; ZENNI, R.D.; GONÇALVES, R.B. Ecological impact and population status of non-native bees in a Brazilian urban environment. *Revista Brasileira de Entomologia*, v. 64, n. 2, Jun. 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/1806-9665-RBENT-2020-0006>.

GRUTER, C. *Stingless bees: their behaviour, ecology and evolution*. Cham: Springer, 2020. 385 p.

GRUTER, C.; SEGERS, F. H. I. D.; MENEZES, C.; VOLLET-NETO, A.; FALCÓN, T.; VON ZUBEN, L.; BITONDI, M. M. G. ; NASCIMENTO, F. S.; ALMEIDA, E. A. B. Repeated evolution of soldier sub-castes suggests parasitism drives social complexity in stingless bees. *Nature Communications*, v. 8, n. 4, Feb. 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/s41467-016-0012-y>.

GUIBU, L.S.; RAMALHO, M.; KLEINERT-GIOVANNINI, A.; IMPERATRIZ-FONSECA, V.L. Exploração de recursos florais por colônias de *Melipona quadrfasciata* (Apidae, Meliponinae). *Revista Brasileira de Biologia*, v. 48, p. 299-305, 1989.

HAMMEL, B.; VOLLET-NETO, A.; MENEZES, C.; NASCIMENTO, F. S.; ENGELS, W.; GRUTER, C. Soldiers in a stingless bee. *The American Naturalist*, v. 187, n. 1, Jan. 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1086/684192>.

HARGREAVES, A. L.; HARDER, L. D.; JOHNSON, S. D. Consumptive emasculation: the ecological and evolutionary consequences of pollen theft. *Biological Reviews*, v. 84 n. 2, p. 259-276, May 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/j.1469-185X.2008.00074.x>.

HEARD, T.A. The role of stingless bees in crop pollination. *Annual review of entomology*, v. 44 n. 1, p.183-206, Jan 1999. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.44.1.183>.

HEARD, T. *The Australian Native Bee Book: keeping stingless bee hives for pets, pollination and sugarbag honey*. Sugarbag bees. 2016.

IBAMA. Ibama suspende cautelarmente aplicação de agrotóxicos à base de fipronil. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/notas/2024/ibama-suspende-cautelaramente-aplicacao-de-agrototoxicos-a-base-de-fipronil>. Acesso em: 18 jan. 2024.

ICMBio. Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção: Volume VII – Invertebrados -- 1. ed. -- Brasília, DF: ICMBio/MMA, 2018.

IDAF. Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal do Espírito Santo. **Instrução Normativa IDAF nº 001, de 17 de abril de 2019**. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/diarios/238043038/does-normal-23-04-2019-pg-29>. Acesso em: 18 set. 2021.

IMPERATRIZ-FONSECA, V.L.; KLEINERT-GIOVANNINI, A.; CORTOPASSI-LAURINO, M.; RAMALHO, M. Hábitos de coleta de *Tetragonisca angustula angustula* Latrielle (Apidae, Meliponinae). *Boletim de Zoologia*, v.8, p. 115-131, 1984.

- IMPERATRIZ-FONSECA, V.L.; KLEINERT-GIOVANNINI, A.; RAMALHO, M. Pollen harvest by eusocial bees in a non-natural community in Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, v. 5, p. 239-242, 1989.
- JACOB, C. R. de O.; ZANARDI, O. Z.; MALAQUIAS, J. B.; SILVA, C. A. S.; YAMAMOTO, P. T. The impact of four widely used neonicotinoid insecticides on *Tetragonisca angustula* (Latreille) (Hymenoptera: Apidae). **Chemosphere**, v. 224, p. 65 -70, Jun. 2019.
- JAFFÉ, R.; POPE, N.; CARVALHO, A. T.; MAIA, U. M.; BLOCHTEIN, B.; CARVALHO, C. A. L.; CARVALHO-ZILSE, G. A.; FREITAS, B. M.; MENEZES, C.; RIBEIRO, M. F.; VENTURIERI, G. C.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L. Bees for development: Brazilian survey reveals how to optimize stingless beekeeping. **PLoS one**, v. 10, n. 3, p. e0121157, June 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0121157>.
- JAFFE, R.; POPE, N.; ACOSTA, A.L.; ALVES, D.A.; ARIAS, M.C.; PILAR R; FRANCISCO, F.O.; GIANNINI, T.C.; GONZÁLEZ-CHAVES, A.; IMPERATRIZ-FONSECA, V.L.; TAVARES, M. G.; JHA, S.; CARVALHEIRO, L.G. Beekeeping practices and geographic distance, not land use, drive gene flow across tropical bees. **Molecular Ecology**, v. 25, n. 21, p. 5345-5358, Sept. 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/mec.13852>.
- JAFFÉ, R.; VEIGA, J.C.; POPE, N.; LANES, E.C. M.; CARVALHO, C.S.; ALVES, R.; ANDRADE, S.C.S.; ARIAS, M.C.; BONATTI, V.; CARVALHO, A.T.; CASTRO, M.S.; CONTRERA, F.A.L.; FRANCOY, T.M.; FREITAS, B.M.; GIANNINI, T.C.; HRNCIR, M.; MARTINS, C.F.; OLIVEIRA, G.; SARAIVA, A.M.; SOUZA, B.A.; IMPERATRIZ-FONSECA, V.L. Landscape genomics to the rescue of a tropical bee threatened by habitat loss and climate change. **Evolutionary Applications**, v. 12, n. 6, p. 1164-1177, Jul. 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/eva.12794>.
- JONES, S. M.; ZWEDEN, J. S.; GRUTER, C.; MENEZES, C.; ALVES, D. A.; NUNES-SILVA, P.; CZACZKES, T.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L.; RATNIEKS, F. L. W. The role of wax and resin in the nestmate recognition system of a stingless bee, *Tetragonisca angustula*. **Behavioral Ecology and Sociobiology**, v. 66, p. 1-12, Jan. 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s00265-011-1246-7>.
- KÄRCHER, M. H.; MENEZES, C.; ALVES, D. A.; BEVERIDGE, O. S.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L.; RATNIEKS, F. L. W. Factors influencing survival duration and choice of virgin queens in the stingless bee *Melipona quadrifasciata*. **Naturwissenschaften**, v. 100, p. 571-580, May 2013.
- KERR, W.E.; CARVALHO, G.A.; NASCIMENTO, V.A. *Abelha uruçú: biologia, manejo e conservação*. Belo Horizonte: Ed. Fundação Acangaú, 1996. 144 pp.
- KLATT, B. K.; HOLZSCHUH, A.; WESTPHAL, C.; CLOUGH, Y.; SMIT, I.; PAWELZIK, E.; TSCHARNTKE, T. Bee pollination improves crop quality, shelf life and commercial value. **Proceedings of the Royal Society B**, v. 281, n. 1775, p. 1-8, Jan. 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1098/rspb.2013.2440>.
- KLEINERT-GIOVANNINI, A.; IMPERATRIZ-FONSECA, V.L. Aspects of the trophic niche of *Melipona marginata marginata* Lepeletier (Apidae, Meliponinae). **Apidologie**, v. 18, p. 69-100, 1987.
- KLEINERT-GIOVANNINI, A.; IMPERATRIZ-FONSECA, V.L.; RAMALHO, M. Exploitation of floral resources by *Plebeia saiqui* Friese (Apidae, Meliponinae). In: EDER, J. REMBOLD, H., (eds.) **Chemistry and biology of social insects**. Munchen: Verlag J. Peperny. p. 156-157, 1987.
- KROISS, J., KALTENPOTH, M.; SCHNEIDER, B.; SCHWINGER, M.G.; HERTWECK, C.; MADDULA, R.K.; STROHM, E.; SVATOS, A. Symbiotic streptomycetes provide antibiotic

combination prophylaxis for wasp offspring. **Nature Chemical Biology**, v. 6, p. 261–263, Apr. 2010. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/nchembio.331>.

LEÃO, K. L.; QUEIROZ, A. C. M.; VEIGA, J. C.; CONTRERA, F. A. L.; VENTURIERI, G. C. Colony development and management of the stingless bee *Scaptotrigona* aff. *postica* (Apidae: Meliponini) using different hive models. **Sociobiology**, v. 63, n. 4, p. 1038-1045, Dec. 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.13102/sociobiology.v63i4.1041>.

LIMA, A. C. V. de; CAMARGO, R. C. R. de; QUEIROGA, J. L. de; MALAGODI-BRAGA, K. S. O potencial dos sistemas agroflorestais agroecológicos e biodiversos para a conservação de abelhas nativas e a criação racional de abelhas-sem-ferrão. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 14., 2020, Campinas. **Anais**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2020. p. 1-12.

MACHADO, J.O. Simbiose entre as abelhas sociais brasileiras (Meliponinae, Apidae) e uma espécie de bactéria. **Ciência e Cultura**, v. 23, p. 625–633, 1971.

MALAGODI-BRAGA, K.S; KLEINERT, A.M.P. Pollen harvest by *Schwarziana quadripunctata* (Apidae, Meliponinae). In: International Workshop on Non-Apis Bees and their role as Crop Pollinators, Logan, Utah (USA). **Annals**, p. 37, 1992.

MALAGODI-BRAGA, K.S; KLEINERT, A.M.P. Comparative analysis of two sampling techniques for pollen gathered by *Nannotrigona testaceicornis* Lepelletier (Apidae, Meliponini). **Genetic and Molecular Research**, v. 8, n. 2, p. 596-606, 2009.

MALAGODI-BRAGA, K. S. A polinização como fator de produção na cultura do morango. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2018. 13 p. (Embrapa Meio Ambiente. Comunicado técnico, 56).

MARTÍNEZ-LÓPEZ, V.; RUIZ, C.; MUÑOZ, I.H.M.; MARTÍN-HERNÁNDEZ, R.; RÚA, P.D. Detection of Microsporidia in Pollinator Communities of a Mediterranean Biodiversity Hotspot for Wild Bees. **Microbial Ecology**, Sept. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s00248-021-01854-0>.

MATEUS, S.; FERREIRA-CALIMAN, M. J.; MENEZES, C.; GRUTER, C. Beyond temporal-polyethism: division of labor in the eusocial bee *Melipona marginata*. **Insectes Sociaux**, v. 66, p. 317-328, Feb. 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s00040-019-00691-2>.

MENEZES, C.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L. Multiplicação de colônias de *Nannotrigona testaceicornis* (Hymenoptera, Apidae) utilizando rainhas produzidas in vitro. In: Encontro sobre Abelhas, 8., 2008, Ribeirão Preto. **Anais**. Ribeirão Preto: Funpec, 2008.

MENEZES, C.; GRUTER, C.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L.; RATNIEKS, F. L. W. From the cover: a morphologically specialized soldier caste improves colony defense in a neotropical eusocial bee. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 109, p. 1182-1186, Jan 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1073/pnas.1113398109>.

MENEZES, C.; VOLLET-NETO, A.; CONTRERA, F.A.L.; VENTURIERI, G.C.; IMPERATRIZ-FONSECA, V.L. The Role of Useful Microorganisms to Stingless Bees and Stingless Beekeeping. In: **Pot-Honey: a legacy of stingless bee**. New York: Springer, 2013. p. 153-171.

MENEZES, C.; VOLLET-NETO, A.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L. An advance in the in vitro rearing of stingless bee queens. *Apidologie (Celle)*, v. 44, p. 491-500, Feb. 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s13592-013-0197-6>.

MENEZES, C.; VOLLET-NETO, A.; MARSAIOLI, A. J.; ZAMPIERI, D.; FONTOURA, I. C.; LUCHESSI, A. D.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L. A Brazilian social bee must cultivate fungus to survive. *Current Biology*, v. 25, p. 2851-2855, Oct. 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2015.09.028>.

MENEZES, C.; PALUDO, C.R.; PUPO, M.T. A Review of the Artificial Diets Used as Pot-Pollen Substitutes. In: In: VIT, P.; PEDRO, S. R. M.; ROUBIK, D. W. (ed.). *Pot pollen in stingless bee mellittology*. New York: Springer, 2018. p. 253-262.

MORAES, S. S.; BAUTISTA, A. R. L.; VIANA, B. F. Avaliação da toxicidade aguda (DL50 e CL50) de inseticidas para *Scaptotrigona tubiba* (Smith) (Hymenoptera: Apidae): via de contato. *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil*, v. 29, n. 1, p. 31-37, Mar. 2000. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S0301-8059200000100004>.

NANETTI, A.; BORTOLOTTI, L.; CILIA, G. Pathogens Spillover from Honey Bees to Other Arthropods. *Pathogens*, v. 10, n. 8, Aug. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/pathogens10081044>.

NASCIMENTO, V.A.; MATUSITA, S.H.; KERR, W.E. Evidence of hybridization between two species of *Melipona* bees. *Genetic and Molecular Biology*, v. 23, n. 1, p. 79-81, Mar. 2000. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S1415-47572000000100014>.

NICHOLLS, C. I.; ALTIERI, M. A. Plant biodiversity enhances bees and other insect pollinators in agroecosystems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 33, p. 257-274, Apr. 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s13593-012-0092-y>.

NOGUEIRA J, RAMOS JDC, BENEVENUTO J, FERNANDES-SALOMAO TM, RESENDE HC, DE OLIVEIRA CAMPOS LA, TAVARES MG. Conservation study of an endangered stingless bee (*Melipona capixaba*—Hymenoptera: Apidae) with restricted distribution in Brazil. 2014. *Journal of Insect Conservation*, v. 18, p. 317-326, Jun. 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s10841-014-9639-3>.

NOGUEIRA-NETO, P. *Vida e criação de abelhas indígenas sem ferrão*. São Paulo: Nogueirapis, 1997. 446 p

NOGUEIRA-NETO, P. Inbreeding and building up small populations of stingless bees (Hymenoptera, Apidae). *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 19, p. 1181-1214, 2002. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S0101-81752002000400025>.

NUNES-SILVA, P. Transmissão de parasitas e patógenos em espécies exóticas. In: Vollet Neto, A.; Menezes, C. (Org.). *Desafios e recomendações para o manejo e o transporte de polinizadores*. São Paulo: Associação Brasileira de Estudos das Abelhas, 2018, p. 49-62.

OLIVEIRA, R. M.; GIANNOTTI, E.; MACHADO, V. L. L. Visitantes florais de *Spathodea campanulata* Beauv. (Bignoniaceae). *Bioikos*, v. 5, 1991. Disponível em: <http://periodicos.puc-campinas.edu.br/seer/index.php/bioikos/article/view/984/961>. Acesso em: 3 jul. 2021.

OLIVEIRA, A. P. M.; VENTURIERI, G. C.; CONTRERA, F.A.L. Body size variation, abundance and control techniques of *Pseudohypocera kerteszi* (DIPTERA: PHORIDAE), a plague of stingless bee keeping. *Bulletin of Insectology*, v. 66, p. 203-208, 2013.

- OSTERMAN, J.; AIZEN, M.A.; BIESMEIJER, J.C.; BOSCH, J.; HOWLETT, B.G.; INOUE, D.W.; JUNG, C.; MARTINS, D.J.; MEDEL, R.; PAUW, A.; SEYMOUR, C.L. Global trends in the number and diversity of managed pollinator species. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 322, 107653. Dec. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2021.107653>.
- PALUDO, C. R.; MENEZES, C.; SILVA-JUNIOR, E. A. ; VOLLET-NETO, A.; ANDRADE-DOMINGUEZ, A.; PISHCHANY, G.; KHADEMPOUR, L.; NASCIMENTO, F. S.; CURRIE, C. R.; KOLTER, R.; CLARDY, J.; PUPO, M. T. Stingless bee larvae require fungal steroid to pupate. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1122, Jan. 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-19583-9>.
- PALUDO, C. R.; PISHCHANY, G.; ANDRADE-DOMINGUEZ, A.; SILVA-JUNIOR, E. A.; MENEZES, C.; NASCIMENTO, F. S.; CURRIE, C. R.; KOLTER, R.; CLARDY, J.; PUPO, M. T. Microbial community modulates growth of symbiotic fungus required for stingless bee metamorphosis. *PLoS One*, v. 14, July 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0219696>.
- PETTIS, J.S.; LICHTENBERG, E.M.; ANDREE, M.; STITZINGER, J.; ROSE, R.; vanENGELSDORP, D. Crops pollination exposes honey bees to pesticides which alters their susceptibility to the gut pathogen *Nosema ceranae*. *Plos One*, v. 8, n. 7, Jul 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0070182>.
- PIRES, N. V. C. R.; VENTURIERI, G. C.; CONTRERA, F. A. L. *Elaboração de uma dieta artificial protéica para *Melipona fasciculata**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2009. 23 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 363).
- PORTUGAL-ARAÚJO, V. O perigo de dispersão da tulipeira do gabão (*Spathodea campanulata* Beauv.). *Chácaras e Quintais*, v. 107, 1963.
- POSEY, D.A. Ethnobiology as an emic guide to cultural systems: the case of the insects and the Kayapó indians of Amazonia. *Revista brasileira de Zoologia*, v. 1, n. 3, p. 135-144, 1983.
- POSEY, D.A. 1986. Introdução: Etnobiologia, teoria e prática. In: RIBEIRO, D. (Ed.): *Suma Brasileira de Etnobiologia*. Vol. I, Petrópolis: Ed Vozes/FINEP, pp. 15-25.
- POTTS, S. G.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L.; NGO, H. T.; AIZEN, M. A.; BIESMEIJER, J. C.; BREEZE, T. D.; DICKS, L. V.; GARIBALDI, L. A.; HILL, R.; SETTELE, G.; VANBERGEN, A. J. Safeguarding pollinators and their values to human well being. *Nature*, n. 540, p. 220-229, Nov. 2016a.
- POTTS, S.G.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L.; NGO, H. T. (ed.). *The assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn: Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2016b, 552 p. DOI: <https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.3402856>.
- PRATO, M.; SOARES, A. E. E. Production of sexuals and mating frequency in the stingless bee *Tetragonisca angustula* (Latreille) (Hymenoptera, Apidae). *Neotropical Entomology*, v. 42, p. 474-482, Oct. 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s13744-013-0154-0>.
- PROMNUAN, Y.; KUDO, T.; CHANTAWANNAKUL, P. Actinomycetes isolated from beehives in Thailand. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 25, p. 1685-1689, May. 2009.

- QUEIROZ, A. C. M.; CONTRERA, F. A. L.; VENTURIERI, G. C. The effect of toxic nectar and pollen from *Spathodea campanulata* on the worker survival of *Melipona fasciculata* Smith and *Melipona seminigra* Friese, two Amazonian stingless bees (Hymenoptera: Apidae: Meliponini). **Sociobiology**, v. 61, p. 536-540, Dec. 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.13102/sociobiology.v61i4.536-540>.
- QUEIROZ, A. C. M.; LEÃO, K. L.; CONTRERA, F. A. L.; TEIXEIRA, J. C. S.; MENEZES, C. Stingless bees fed on fermented soybean-extract-based diet had reduced lifespan than pollen-fed workers. **Sociobiology**, v. 66, n. 1, p. 107-112, Apr. 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.13102/sociobiology.v66i1.3383>.
- QUEZADA-EUÁN, J. J. G. **Stingless bees of Mexico: the biology, management and conservation of an ancient heritage**. New York: Springer, 2018. 294 p.
- RAMALHO, M. Foraging by stingless bees of the genus *Scaptotrigona* (Apidae, Meliponinae). **Journal of Apicultural Research**, v. 29, n. 2, p. 61-67, 1990.
- RAMALHO, M. Stingless bees and mass flowering trees in the canopy of Atlantic Forest: a tight relationship. **Acta Botanica Brasilica**, v. 18, n. 1, p. 37-47, Mar 2004. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S0102-33062004000100005>.
- RAMALHO, M.; IMPERATRIZ-FONSECA, V.L.; KLEINERT-GIOVANNINI, A.; CORTOPASSI-LAURINO, M. Exploitation of floral resources by *Plebeia remota* (Holmberg) (Apidae, Meliponinae). **Apidologie**, v. 16, p. 307-330, 1985.
- RAMÍREZ, V.M.; AYALA, R.; GONZÁLEZ, H.D. Crop pollination by stingless bees. In: VIT, P.; PEDRO, S. R. M.; ROUBIK, D. W. (ed.). **Pot pollen in stingless bee mellittology**. New York: Springer, 2018, pp. 139-153.
- RECH, A.R.; SCHWADE, M.A.; SCHWADE, M.R.M. Abelhas-sem-ferrão amazônicas defendem meliponários contra saques de outras abelhas. **Acta Amazonica**, v. 43, p. 389-393. Sept. 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672013000300016>.
- RESENDE, H. C., FERNANDES-SALOMÃO, T. M., TAVARES, M. G.; CAMPOS, L. A. O. Geographic Distribution, Key Challenges and Prospects for the Conservation of Threatened Stingless Bee *Melipona capixaba* Moure e Camargo (Hymenoptera: Apidae). **Sociobiology**, v. 61, n. 4, p. 529-535, Dec. 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.13102/sociobiology.v61i4.529-535>.
- RUBINHO M. P.; CARVALHO, P. L. N. de; REIS ALLE, E. R. N.; REIS, E.; ALENCAR, S. M. de; IKEGAKI, M. A comprehensive characterization of polyphenols by LC-ESI-QTOF-MS from *Melipona quadrifasciata anthidioides* geopropolis and their antibacterial, antioxidant and antiproliferative effects. **Natural Product Research**, v. 34, n. 21, p. 3139-3144, May 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/14786419.2019.1607851>.
- RUSSO, L. Positive and negative impacts of non-native bee species around the world. **Insects**, v. 7, n. 4, p. 1-22, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/insects7040069>.
- SANTA CATARINA. Secretaria de Estado da Agricultura, da Pesca e do Desenvolvimento Rural. **Portaria SAR n° 37, de 4 de novembro de 2020**. Norma Interna Regulamentadora do mel de abelhas-sem-ferrão. Disponível em: <http://www.cidasc.sc.gov.br/inspecao/files/2020/11/Portaria-SAR-n%C2%BA-37-Mel-de-Abelha-sem-Ferr%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 19 set. 2021.

SANTORO, K. R.; VIEIRA, M. E. Q.; QUEIROZ, M. L.; QUEIROZ, M.C.; BARBOSA, S. B. P. Efeito do tanino de *Stryphnodendron* spp. sobre a longevidade de abelhas *Apis mellifera* L. *Archivos de Zootecnia*, v. 53, 2014. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/495/49520305.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2021.

SANTOS, G.M.; ANTONINI, Y. The traditional knowledge on stingless bees (Apidae: Meliponina) used by the Enawene-Nawe tribe in western Brazil. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, v. 4, n. 1, Oct 2008. DOI: <https://dx.doi.org/10.1186/1746-4269-4-19>.

SANTOS, C. F.; MENEZES, C.; VOLLET-NETO, A.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L. Congregation sites and sleeping roost of male stingless bees (Hymenoptera: Apidae: Meliponini). *Sociobiology*, v. 61, p. 115-118, Mar. 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.13102/sociobiology.v61i1.115-118>.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Resolução SAA n° 52, de 3 de outubro de 2017. *Diário Oficial*: seção I, p. 28, 6 out. 2017. Disponível em: [https://www.imprensaoficial.com.br/DO/Busca-DO2001Documento\\_II\\_4.aspx?link=/2017/executivo%2520secao%2520i/outubro/06/pag\\_0028\\_σTMVPTEUM-MUEQe5VVVS62E6SGCA.pdf&pagina=28&data=06/10/2017&caderno=Executivo%20I&paginaordena-cao=100028](https://www.imprensaoficial.com.br/DO/Busca-DO2001Documento_II_4.aspx?link=/2017/executivo%2520secao%2520i/outubro/06/pag_0028_σTMVPTEUM-MUEQe5VVVS62E6SGCA.pdf&pagina=28&data=06/10/2017&caderno=Executivo%20I&paginaordena-cao=100028). Acesso em: 19 set. 2021.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Centro de Defesa Sanitária Animal. Nota técnica Cedesa n° 03/2019. Ocorrência de Cria Pútrida Europeia em abelhas *Melipona mondury* (Nome vulgar Bugia) no Estado de São Paulo. 2019. Disponível em: <https://www.defesa.agricultura.sp.gov.br/arquivos/sanidade-animais/nota-tecnica-CEDESA-2019-n03-Cria-Putrida-Europeia.pdf>. Acesso em: 24 set. 2021.

SCHWARZ, H. F. Stingless bees (Meliponidae) of the Western Hemisphere. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, v. 90, p. 1-568, 1948.

SEGBERS, F. H. I. D.; MENEZES, C.; VOLLET-NETO, A.; L AMBERT, D.; GRUTER, C. Soldier production in a stingless bee depends on rearing location and nurse behaviour. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, v. 69, p. 613-623, Jan. 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s00265-015-1872-6>.

SILVA, C. A. S.; GODOY, W. A. C.; JACOB, C. R. O.; THOMAS, G.; CÂMARA, G. M. S.; ALVES, D. A. A. Bee pollination highly improves oil quality in sunflower. *Sociobiology*, v. 65, n. 4, p. 583-590, Oct. 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.13102/sociobiology.v65i4.3367>.

SLAA, E.J.; CHAVES, L.A.S.; MALAGODI-BRAGA, K.S.; HOFSTEDE, F.E., Stingless bees in applied pollination: practice and perspectives. *Apidologie*, v. 37, n. 2, p. 293-315, Jun. 2006. DOI: <https://dx.doi.org/10.1051/apido:2006022>.

SOMMEIJER, M.J.; ROOY, G.A.; PUNT, W.; BRUIJN, L.L.M. A comparative study of foraging behavior and pollen resources of various stingless bees (Hym. Meliponinae) and honeybees (Hym. Apinae) in Trinidad, West-Indies. *Apidologie*, v. 14, n. 3, p. 205-225, 1983.

SOTELO-SANTOS, L. E.; ASOMOZA C. A. The Maya universe in a pollen pot: native stingless bees in Pre-Columbian Maya art. In: VIT, P.; PEDRO, S. R. M.; ROUBIK, D. W. (ed.). *Pot pollen in stingless bee melittology*. New York: Springer, 2018. p. 299-312.

SOUZA, E.C.A.D., SILVA, E.J.G.D., CORDEIRO, H.K.C., LAGE, N.M., SILVA, F., REIS, D.L.S.D., PORTO, C., PILAU, E.J., COSTA, L.A., DE SOUZA, A.D.; MENEZES, C.; FLACH, A. Chemical compositions and

antioxidant and antimicrobial activities of propolis produced by *Frieseomelitta longipes* and *Apis mellifera* bees. *Química Nova*, 41, pp. 485-491. 2018.

SOUZA, E.C.A.; MENEZES, C.; FLACH, A. Stingless bee honey (Hymenoptera, Apidae, Meliponini): a review of quality control, chemical profile, and biological potential. *Apidologie* v. 52, p. 113 – 132, Jan 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s13592-020-00802-0>.

TEIXEIRA, J.; QUEIROZ, A. C. M.; VEIGA, J. C.; LEÃO, K. L.; CONTRERA, F. A. L.; DOMINGUES, F.; FONTES, J. E.; LOPES, T.; MARSAIOLI, A.; MENEZES, C. Soy extract as protein replacement to feed *Melipona flavolineata* Friese (Hymenoptera, Apidae, Meliponini). *Journal of Apicultural Research*, v. 1, p. 1-11, Oct. 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/00218839.2019.1671639>.

TEIXEIRA, E.T.; FERREIRA, E.A.; LUZ, C.F.P.; MARTINS, M.F.; RAMOS, T.A.; LOURENÇO, A.P. European Foulbrood in stingless bees (Apidae: Meliponini) in Brazil: Old disease, renewed threat. *Journal of Invertebrate Pathology*, V. 172, 2020, ISSN 0022-2011, DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jip.2020.107357>.

THOMPSON, H. M. Behavioural effects of pesticide in bees-their potential for use in risk assessment. *Ecotoxicology*, v. 12, p. 317-330, Feb. 2003.

TRIGO, J. R.; SANTOS, W. F. Insect mortality in *Spathodea campanulata* Beauv. (Bignoniaceae) flowers. *Revista Brasileira de Biologia*, v. 60, Aug. 2000. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S0034-71082000000300019>.

VALIDO, A., RODRIGUEZ-RODRIGUEZ, M. C., JORDANO, P., 2019. Honeybees disrupt the structure and functionality of plant-pollinator networks. *Science Report*, v. 9, n. 1, p. 1-11. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-41271-5>.

VANBERGEN, A.J.; AIZEN, M.A.; CORDEAU, S.; GARIBALDI, L.A.; GARRATT, M.P.; KOVÁCS-HOSTYÁNSZKI, A.; LECUYER, L.; NGO, H.T.; POTTS, S.G.; SETTELE, J.; SKRIMIZEA, E. Transformation of agricultural landscapes in the Anthropocene: Nature's contributions to people, agriculture and food security. *Advances in Ecological Research*, v. 63, p. 193-253. 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/bs.aecr.2020.08.002>.

VEIGA, J. C.; MENEZES, C.; VENTURIERI, G. C.; CONTRERA, F. A. L. The bigger, the smaller: relationship between body size and food stores in the stingless bee *Melipona flavolineata*. *Apidologie*, v. 44, p. 324-333, Dec. 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s13592-012-0183-4>.

VEIGA, J. C.; LEÃO, K. L.; COELHO, B. W.; QUEIROZ, A. C. M.; MENEZES, C.; CONTRERA, F. A. L. The Life Histories of the 'Uruçu Amarela' Males (*Melipona flavolineata*, Apidae, Meliponini). *Sociobiology*, v. 65, n. 4, p. 780, Oct. 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.13102/sociobiology.v65i4>.

VEIGA, J. C.; RUIZ, G. R. S.; CARVALHO-ZILSE, G. A.; MENEZES, C.; CONTRERA, F. A. L. Queens remate despite traumatic mating in stingless bees. *Current Zoology*, p. 1-12, Mar. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1093/cz/zoab019>.

VENTURIERI, G. C. *Caixa para criação de uruçu amarela Melipona flavolineata* Friese, 1900. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2008. 8 p. (Embrapa Amazonia Oriental. Comunicado técnico, 212).

VENTURIERI, G. C.; ALVES, D. A.; VILLAS-BÔAS, J. K.; CARVALHO, C. A. L.; MENEZES, C.; VOLLETNETO, A.; CONTRERA, F. A. L.; CORTOPASSI-LAURINO, M.; NOGUEIRA-NETO, P.; IMPERATRIZ-

FONSECA, V. L. Meliponicultura no Brasil: situação atual e perspectivas futuras para o uso na polinização agrícola. In: IMPERATRIZ-FONSECA, V. L.; CANHOS, D. A. L.; ALVES, D. A.; SARAIVA, A. M. (ed.). **Polinizadores no Brasil: contribuições e perspectivas para a biodiversidade, uso sustentável, conservação e serviços ambientais**. São Paulo: Edusp, 2012. p. 213-236.

VILLAS-BÔAS, J. **Manual tecnológico: mel de abelhas-sem-ferrão**. Brasília, DF: ISPN, 2012. 95 p.

VOLLET-NETO, A.; MENEZES, C.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L. Behavioural and developmental responses of a stingless bee (*Scaptotrigona depilis*) to nest overheating. *Apidologie*, v. 46, p. 455-464, Dec. 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s13592-014-0338-6>.

VOLLET-NETO, A.; MAIA-SILVA, C.; MENEZES, C.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L. Newly emerged workers of the stingless bee *Scaptotrigona* aff. *depilis* prefer stored pollen to fresh pollen. *Apidologie*, v. 48, p. 204-210, Mar 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s13592-016-0464-4>.

VOLLET-NETO, A.; KOFFLER, S.; SANTOS, C. F. dos; MENEZES, C.; NUNES, F. M. F.; HARTFELDER, K.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L.; ALVES, D. A. Recent advances in reproductive biology of stingless bees. *Insectes sociaux*, v. 65, p. 201-212, Feb. 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s00040-018-0607-x>.

VOLLET-NETO, A.; MENEZES, C. **Desafios e recomendações para manejo e transporte de polinizadores**. São Paulo: Associação Brasileira de Estudos das Abelhas, 2018. 100 p.

WEAVER, N.; WEAVER, E. C. Beekeeping with the stingless bee *Melipona beecheii*, by the Yucatecan Maya. *Bee World*, v. 62: 7-19, 1981. DOI: <https://doi.org/10.1080/0005772X.1981.11097806>.

WOLOWSKI, M.; AGOSTINI, K.; RECH, A. R.; VARASSIN, I. G.; MAUÉS, M.; FREITAS, L.; CARNEIRO, L. T.; BUENO, R. O.; CONSOLARO, H.; CARVALHEIRO, L.; SARAIVA, A. M.; SILVA, C. I. **Sumário para tomadores de decisão: 1. Relatório temático sobre polinização, polinizadores e produção de alimentos no Brasil**. Campinas, 2018. 20 p. DOI: <https://dx.doi.org/10.5935/978-85-5697-762-5>.

ZRALKA, J.; KOSZKUL, W.; RADNICKA, K.; SOTELO-SANTOS, L. E.; HERMES, B. Excavations in Nakum structure 99: new data on protoclassic rituals and precolumbian Maya beekeeping. *Estudios de Cultura Maya*, v. 44, p. 85-117, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.19130/iifl.ecm.2014.44.790>.

# DIMENSÃO SOCIAL E ECONÔMICA DOS SISTEMAS AGROALIMENTARES DA AGRICULTURA FAMILIAR

*Lucimar Santiago de Abreu, Alfredo José Barreto Luiz e Victor Paulo Marques Simão*

## INTRODUÇÃO

A utilização de bases de dados bibliográficos tem sido cada vez mais adotada no meio científico. Ela permite identificar a trajetória do desenvolvimento do conhecimento, sua evolução e suas lacunas, da mesma maneira que propicia a geração de novas proposições de pesquisas a partir das informações geradas.

O objetivo do capítulo é analisar o desenvolvimento do conhecimento no âmbito da agricultura familiar, apresentando as principais contribuições científicas produzidas pela Embrapa Meio Ambiente entre 1994 e 2020. Será dado destaque aos trabalhos que discutem, de maneira central, questões de natureza social e econômica da agricultura familiar.

O trabalho identifica as publicações disponíveis na Base de Dados da Pesquisa Agropecuária (BDPA) da Embrapa. Por meio da revisão bibliográfica, será realizada análise qualitativa de conteúdo sociológico das seguintes variáveis: tipo de público (agricultores familiares, empresas familiares, assentados da reforma agrária, povos tradicionais, mulheres agricultoras, etc.) e os principais temas investigados, questões de pesquisas e resultados para os problemas que originaram a pesquisa. Desse modo, o capítulo apresenta o itinerário das pesquisas conduzidas no âmbito da agricultura familiar e suas contribuições sociais e econômicas mais expressivas.

Como ponto básico do enfoque das pesquisas, partiu-se de uma constatação empírica, qual seja: em todo o território brasileiro, onde o mercado organiza as trocas, a produção de alimentos é assegurada pelas unidades produtivas familiares, ou seja, onde a família participa da produção. É necessário, portanto, reconhecer a diversidade de situações nas quais, em algumas regiões ou territórios, ela se encontra totalmente integrada a distintas modalidades de inserção ao mercado (mercado institucional, supermercados, lojas, feiras livres, entregas diretas, etc.), enquanto, em outros espaços geográficos, é fundada na economia da subsistência. Contudo, é a única forma social

de produção capaz de garantir a oferta de alimentos para o conjunto da sociedade e satisfazer suas necessidades fundamentais.

Os principais trabalhos científicos que tratam da dimensão social e econômica da produção familiar se apresentam agrupados em:

1. Agricultura familiar e desenvolvimento sustentável;
2. Diversidade social das formas de produção e a relação com o meio ambiente;
3. Agricultura familiar e políticas públicas;
4. Agricultura familiar e transição ecológica;
5. Redes alternativas agroalimentares e inovações sociais; e
6. Outros temas que perpassam o universo da pesquisa em agricultura familiar.

Cabe destacar que as pesquisas desenvolvidas foram fruto de diversas parcerias, as quais contribuíram para a geração de conhecimentos, que serão objeto de descrição sintética. A equipe, ao longo do período analisado, foi constituída por pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente e parceiros de diversas instituições nacionais e internacionais – em especial, a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), com o Programa de Pós-Graduação em Agroecologia e Desenvolvimento Rural, e a Universidade Federal do Paraná (UFPR). Parceiros e alunos de outros países também fizeram parte, oriundos da França – inicialmente com a Universidade de Paris X Nanterre, seguida do Institut National Recherche Agronomique (Inrae) e École des hautes études en sciences sociales (EHESS) –, Dinamarca – International Centre for Research in Organic Food Systems (ICROFS) –, China – College of Resource and Environmental Science (Cers), China Agricultural University (CAU) – e Egito – Ain Shams University (ASU). Pesquisadores e estudantes das instituições referidas participaram de projetos de cooperação interinstitucional, proporcionando, ao longo do período mencionado, um fértil diálogo e troca de conhecimentos que ocorreram em diversas reuniões; visitas técnicas e científicas a produtores; seminários; elaboração de publicações em coautoria, desenvolvidas no âmbito das pesquisas de colaboração; além de orientações de teses de doutorado e dissertações de mestrado.

Neste sentido, o conjunto de atividades dos projetos ancorou-se na perspectiva analítica das ciências sociais, mas se abriu para colaborações mais amplas, provenientes das ciências econômicas e agrônômicas, levando em conta a formação disciplinar da equipe da Embrapa Meio Ambiente e das instituições parceiras (Abreu; Bellon, 2017).

Destaque deve ser dado ao debate sobre questões sociais da obra de Ramos Filho (2006), *Agricultura, meio ambiente e inclusão social: questões para debate*, construída com a contribuição de diversos especialistas em agricultura familiar.

As pesquisas foram conduzidas em diversas regiões do país, desde territórios de agricultura intensiva no município de Guaira, SP, até áreas de preservação ambiental e de agricultura diversificada em Tapiraí, Apiaí, Barra do Chapéu, Eldorado, Sete

Barras e Cananéia. Estes municípios estão localizados na porção paulista do Vale do Ribeira, região com baixo índice de desenvolvimento humano (IDH) e de grandes contrastes e conflitos socioambientais decorrentes de atividades econômicas que ameaçam o equilíbrio dos recursos naturais.

Foram igualmente conduzidas pesquisas nos municípios de Ibiúna, Sorocaba, Itápolis, Campinas, entre outros, no estado de São Paulo. No Espírito do Santo, em Vitória, o estudo ocorreu nos sistemas agroalimentares em transição ecológica. O objetivo era investigar a aplicação de princípios e práticas definidos para os sistemas orgânicos e pela agroecologia, os processos de institucionalização e as políticas de apoio à transição, além das pesquisas sobre redes sociotécnicas e inovação social, mercados, comparação de preços entre convencionais e orgânicos e motivações do consumo de alimentos orgânicos certificados.

Estudos de casos foram desenvolvidos na região de Ouro Preto do Oeste, em Rondônia, região Amazônica, onde foi reconstituído o processo de transição convencional para sistemas agroflorestais. Esse estudo buscou entender a contribuição desses sistemas, constituídos por agricultura, criação animal e florestas, em relação à crise ambiental, identificando e caracterizando a diversidade ambiental, destacando os impactos positivos em relação à segurança alimentar e o papel das mulheres agricultoras. Ocorreram contribuições em projetos de parceiros da Embrapa Acre, na região de Rio Branco, AC, em feiras com produtores e consumidores orgânicos da capital.

## Descrição da Metodologia Quantitativa

A Embrapa Meio Ambiente dispõe de um recurso para registro digital das atividades de seus empregados, com acesso para consulta pela rede interna de computadores. O sistema foi idealizado para servir de suporte ao planejamento e acompanhamento do Plano Anual de Trabalho (PAT) individual. Para definir o universo inicial de trabalho nesse estudo, foi utilizada a consulta à página principal do PAT. O sistema armazena toda a produção dos empregados atuais e que já passaram pela Unidade. Os registros tiveram início no ano 2000 e contam com 28.484 entradas, originadas por 115 pesquisadores (é preciso ter em mente que produtos com dois ou mais autores/pesquisadores possuem múltiplos registros, pois a contabilidade é feita por empregado, não por produto, neste caso).

Foram selecionados todos os registros que contivessem no texto de sua descrição o morfema “família”, de forma que os que tinham as palavras “família”, “familiar” ou “familiares” foram recuperados. Após a seleção, foram eliminados os registros não relacionados à agricultura familiar, como, por exemplo, as matérias jornalísticas apresentadas na Rede Família ou trabalhos sobre “familiaridade”, no sentido de estar familiarizado com um assunto. Também foram desconsiderados os registros re-

lativos à captação de recursos, por não tratarem de resultados do ponto de vista de contribuição técnico científica. Por fim, foram considerados todos os registros com a palavra “familiar” (ou similar) no título. Algumas exceções foram feitas quando a palavra não estava no título principal do registro. Entretanto, o registro era parte de um todo no qual a palavra tema figurava. Os principais exemplos são trabalhos apresentados em eventos específicos da agricultura familiar ou textos incluídos em uma publicação maior (capítulo de livro ou artigo em anais) cujo título também era alusivo à agricultura familiar.

Foram encontrados no PAT da Embrapa Meio Ambiente, de 2000 a maio de 2021: 10 artigos em periódicos; 48 artigos em anais de congresso (ou nota técnica); 5 textos na série Documentos; 1 boletim de pesquisa; 13 capítulos em livros técnico-científicos; 12 resumos em anais de congressos; 7 dias de campo; 2 fôlders, folhetos ou cartilhas; 2 metodologias científicas; 11 cursos; 38 eventos; 1 livro; 5 orientações de pós-graduação; 36 palestras; 1 participação em exposição e feiras; e 40 matérias jornalísticas ou artigos de divulgação na mídia.

A partir desse conjunto de registros foram extraídos os nomes de todos os autores e coautores para realizar uma contagem de participação de cada um. No total, foram identificados 148 nomes, muitos dos quais são parceiros da Embrapa Meio Ambiente. Destes, 86 figuraram apenas uma vez na lista, 27 apareceram com duas colaborações e 26 frequentaram entre três e nove vezes os registros. Apenas 8 pessoas responderam por mais de 10 entradas e, em conjunto, foram responsáveis por 46,3% de toda a produção com o termo “familiar” registrada no PAT. Os nomes destes pesquisadores foram, então, selecionados para uma segunda etapa do processo de seleção das publicações.

## Descrição da Metodologia Qualitativa

Inicialmente, partiu-se do conjunto dos responsáveis por 46,3% de toda a produção científica em agricultura familiar da Embrapa Meio Ambiente, conforme indicado no tópico anterior. Contudo, estabeleceu-se um recorte mais amplo para a análise qualitativa da contribuição desses autores, baseado nos seguintes critérios:

1. Identificação das publicações na base de dados BDPA da Embrapa, cujo público-alvo é a categoria social denominada “produtores familiares”, tendo essas pesquisas sido operacionalizadas através de interação direta ou indireta entre produtor familiar e pesquisador. O sistema BDPA da Embrapa expressa quase que completamente a totalidade das publicações dos autores identificados no tópico anterior.
2. As publicações que tratam de aspectos associados às dimensões social e econômica da produção familiar foram selecionadas. Neste capítulo, serão apresentados os principais objetivos, problemáticas e as conclusões destas publica-

ções. Além disso, alguns estudos envolveram outros tipos de atores-chave, os quais agem profissionalmente em redes de desenvolvimento rural em diversos contextos das áreas de estudos. Portanto, em interação com a categoria social “produtor familiar”, observou-se a ação de técnicos da extensão rural, pesquisadores, consumidores etc.

3. A análise de conteúdo desse levantamento de publicações buscou obter representatividade do conjunto das pesquisas realizadas pela Unidade dentro do campo específico mencionado. O corpus da análise bibliográfica foi fornecido pelo levantamento das publicações em revistas científicas, capítulos de livros, livros e documentos da série Embrapa entre os anos 1990 até 2020. Em seguida, abre-se para a qualificação de problemas, questões e temas de pesquisa, sempre no âmbito da produção familiar, que abordem aspectos sociais e econômicos.

Portanto, a seleção do material envolveu a aplicação de parâmetros quantitativos para definição da amostra de pesquisa, bem como a análise qualitativa sociológica (análise descritiva), apresentada em formato de síntese e restrita às contribuições vinculadas às dimensões social e econômica da produção familiar. Naturalmente, dado o amplo conjunto da bibliografia, foi necessário selecionar o material mais relevante e factível de revisão.

No geral, as metodologias adotadas para a operacionalização das pesquisas são de natureza construtivista e calcadas majoritariamente no aporte teórico e conceitual das ciências sociais (Abreu, 2011). Muitas vezes utilizando métodos simultaneamente qualitativos e quantitativos, ou seja, dados estatísticos da produção familiar – do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), do Cadastro Nacional de Produtores Orgânicos (CNPO), vinculados ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) –, revisões da literatura, além de coletas de informações disponibilizadas por produtores e técnicos e de recentes investigações com atores-chave das redes de agricultura sustentável, agroecologia e agricultura orgânica (AO).

Em síntese, no processo de operacionalização das pesquisas, foram utilizadas informações públicas disponíveis e dados adquiridos em pesquisas de campo através de entrevistas qualitativas e, quando possível e pertinente, análise quantitativa de questionários construídos com questões fechadas. Porém, este último requer a disponibilidade de especialistas em métodos quantitativos e estatísticas com conhecimento de análise multifatorial aplicada às ciências sociais.

As consultas ocorreram por meio do estabelecimento de contatos presenciais, troca de mensagens eletrônicas, participação em reuniões técnicas e eventos. Portanto, um conjunto de materiais foi manejado no processo de geração do conhecimento.

## TEMAS DA PRODUÇÃO FAMILIAR, PROBLEMAS, QUESTÕES, RESULTADOS E CONCLUSÕES DAS PESQUISAS

### Agricultura Familiar e o Desenvolvimento Sustentável

Na década de 1990, algumas publicações já destacavam que as transformações tecnológicas na agricultura colocavam questões que agregavam elementos novos à discussão sobre o processo de modernização da agricultura. Uma dessas questões relevantes era a premência de avaliar o impacto causado pelas transformações tecnológicas no processo de trabalho agrícola, bem como nas relações sociais e no meio ambiente rural. Essa temática dupla (social e ambiental) foi incluída em um projeto de pesquisa do antigo Centro Nacional de Avaliação de Pesquisa de Monitoramento e Avaliação de Impacto Ambiental (CNPMA), atual Embrapa Meio Ambiente, e foi parte de uma tese de mestrado, desenvolvida entre 1991 e início de 1994 (Abreu, 1994). As conclusões desta pesquisa permitiram contribuir também com a formulação de políticas públicas, tendo em vista a solução de problemas sociais e ambientais da agricultura, particularmente para o chamado sistema de produção produtivista – trazendo, assim, uma contribuição da Embrapa Meio Ambiente para a identificação dos inter-relacionamentos complexos existentes na ação do homem sobre os recursos naturais, com o propósito de minimizar a pobreza, reduzir o êxodo rural e tornar o meio ambiente sustentável ecologicamente.

Ainda no âmbito dos impactos sociais da agricultura familiar (tipo empresarial ou que contrata trabalhadores para tratos culturais e colheita), analisou-se a correlação entre a inserção da tecnologia de irrigação, a composição e a sazonalidade da força de trabalho no município de Guaira, SP. O estudo também considerou que o processo de modernização da agricultura foi executado mediante a adoção de novas tecnologias que implicaram no aumento da sazonalidade e mudanças no processo de trabalho. O método utilizado foi o estudo de caso. A hipótese desenvolvida é que, ao aumentar o número de jornadas de trabalho, em virtude da existência de mais de uma safra por ano, a irrigação ajuda a diminuir a sazonalidade do trabalho. A dimensão dessa diminuição e o tipo de trabalhador que dela se beneficia dependem de outros elementos, ou seja, ao proporcionar a possibilidade de mais de uma safra por ano, a irrigação é capaz de gerar mais empregos diretos. Porém, a maioria dos empregos gerados são de caráter temporário, e a quantidade de empregos diretos gerados tem estreita relação com o tipo de produto cultivado, intensidade de uso da terra, sistema de irrigação adotado e tamanho da área irrigada. O tipo de trabalhador mais observado neste contexto foram os volantes (Abreu, 1995).

A principal conclusão alcançada foi de que a modernização da agricultura com fins meramente econômicos é responsável por danos sociais e ambientais profun-

dos, com os trabalhadores rurais constituindo o segmento social mais marginalizado, vivendo em condições de pobreza absoluta. A questão ambiental é percebida como secundária pelos produtores irrigantes, que priorizam a elevação da produtividade objetivando maximizar os lucros, ou seja, a noção de risco ambiental está associada à racionalidade econômica. Dessa forma, os agricultores seguem as recomendações agrônômicas tendo em vista, primeiramente, a viabilidade econômica da unidade de produção. Os insumos modernos são utilizados em larga escala e o aproveitamento dos recursos naturais é integral. Por fim, a autora destaca o papel do Estado na consolidação da articulação entre a agricultura e o mercado de insumos e o de transformação dos produtos agrícolas (Abreu, 1994).

A contribuição desta obra consiste, através de um estudo de caso, na apresentação dessas constatações que, em verdade, são válidas para praticamente todos os núcleos de agricultores capitalizados do país, além da imperiosa necessidade de formular um novo modelo de desenvolvimento agrícola que resolva o problema histórico da desarticulação entre economia e sociedade. É necessário que o Estado passe a implementar concretamente novas estratégias de desenvolvimento que garantam a sobrevivência da população rural de forma digna, sem o comprometimento, a longo prazo, dos recursos naturais e do bem estar das gerações futuras.

Outra pesquisa desenvolvida pela Embrapa Meio Ambiente buscou ampliar o horizonte da análise, quiçá contribuir teórica e conceitualmente para o debate em curso da época, e mergulhou no contexto sociocultural das raízes dos problemas ecológicos (Quirino; Abreu, 2000), dramatizados pela evidência súbita do perigo de aniquilamento que se tornou a dominação do homem sobre a natureza e o uso da ciência para a produção industrial e agropecuária produtivista. Narra o surgimento da consciência ecológica e dos movimentos sociais ambientalistas em países e circunstâncias selecionadas. São postos em relevo os aspectos relacionados à agropecuária e aos agroecossistemas. A seguir, considera como as ciências sociais foram instadas a explicar as relações deletérias entre a humanidade e a natureza e como se armaram teoricamente para isso, contrapondo-se a sua tradição clássica e à da sociologia, em particular, que tende a abstrair o contexto biofísico em que a sociedade se assenta. Finalmente, considera uma agenda de caminhos teóricos e prioridades substantivas para estudos agroecológicos do ponto de vista das ciências sociais (Quirino; Abreu, 2000). Tais prioridades foram desenvolvidas e ampliadas nas agendas de pesquisa da temática da produção familiar nos anos subsequentes.

## Diversidade Social das Formas de Produção Agrícolas e a Relação com o Meio Ambiente

Os problemas relacionados ao conhecimento da diversidade social e ambiental da agricultura familiar foram elencados como prioridades na agenda de pesquisa. Com isso, rapidamente formaram uma temática importante de investigação do campo da sociologia rural, a qual foi tratada por pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente. Assim, entre 1999 e 2005, a Embrapa Meio Ambiente desenvolveu um projeto denominado Estudo sobre a Diversidade de Formas de Produção Agrícolas Familiares e a Relação Com O Meio Ambiente. Essa experiência de pesquisa aborda de forma inovadora e transdisciplinar múltiplas dimensões do desenvolvimento sustentável, tendo também papel crucial na definição de pesquisas de natureza sociológica no âmbito da temática da agricultura familiar e da transição de base ecológica (Abreu et al., 2006; Billaud; Abreu, 1999). Uma importante contribuição da Embrapa Meio Ambiente à época expressa um esforço inovador científico duplo, uma vez que se buscou primeiro caracterizar o universo social e empírico das pesquisas, a partir do critério da diversidade social, econômica, ambiental e cultural; e, posteriormente, captar e analisar as percepções e as práticas e manejos agrícolas de diferentes grupos sociais presentes no contexto real da pesquisa.

Em relação à diversidade das formas de produção familiar, estas eram invisíveis no ambiente técnico e expressam, pela denominação “pequeno produtor”, ideia do senso comum, sendo considerada vulgar devido à simplificação da dimensão econômica e sociocultural. Assim, foi importante definir um instrumento conceitual apropriado, bem como identificar, caracterizar e analisar a diversidade das situações em que se encontram os produtores familiares, pois trata-se, na realidade, de uma categoria social heterogênea. Portanto, buscou-se responder: quem são os sujeitos sociais das pesquisas no âmbito da produção familiar; quais são as formas sociais; e como essa categoria se relaciona com os recursos naturais através das práticas e manejos dos recursos naturais.

Uma das primeiras observações dos estudos foi que o termo produtor familiar recobre situações extremamente variadas e diferentes, e se define a partir de um maior ou menor grau de integração com a sociedade econômica. Tanto sob o plano técnico-econômico quanto do plano sociocultural, um determinado grau de integração à sociedade econômica corresponde a uma determinada relação com a sociedade de consumo, um determinado modo de vida (Lamarche, 1993, p. 19, apud Abreu, 2005) e, também, um determinado modo de percepção e de representação do meio ambiente. Entendeu-se, assim, que a consideração dessas variáveis permite que a abordagem dê conta dessa dupla dimensão da unidade de exploração familiar.

Portanto, os conceitos de agricultura familiar e de desenvolvimento sustentável são partes constitutivas dos objetivos das pesquisas em questão. Além disso, também

supõem o engajamento por parte dos agricultores familiares, de técnicos do desenvolvimento e a caracterização da população rural, visando compreender a relação dos produtores agrícolas com a natureza, as técnicas e, de modo global, com o risco ao meio ambiente. Essa foi uma das principais metas de ação da geração de conhecimentos, tecnologias e do desenvolvimento sustentável dos primeiros anos do século XXI, mas que teve seu princípio no final dos anos 1990.

Esses trabalhos foram realizados a partir de estudos empíricos em diversas regiões do Brasil. A abordagem metodológica definida permitia analisar o uso de técnicas e manejos em sistemas produtivos e as percepções dos agricultores sobre o meio ambiente, a fim de relacioná-las. Muitos destes agricultores se encontram em situações de contraste em relação ao plano tecnológico, diante da incerteza científica e técnica. Portanto, esses estudos geravam tipologias do universo social dos produtores, das atitudes e comportamentos diante dos recursos naturais. As pesquisas foram o meio encontrado para interrogar sobre o papel da natureza nas sociedades modernas, que é dependente de um duplo processo, do qual se estuda a dinâmica: como se articulam, dentro de uma certa configuração territorial, a relação entre os processos técnicos e sociais e os dispositivos de gestão? (Abreu, 2005)

Com base em estudos precedentes desenvolvidos por Abreu (2005), adotou-se o conceito de formas sociais de produção familiar, que se define a partir das lógicas de funcionamento dos estabelecimentos rurais. Por “formas sociais de produção”, entende-se não apenas a descrição das diversas situações materiais ou econômicas nas quais os agricultores se encontram (superfície, tipo de cultura, tipo de criação, situações econômicas e financeiras, etc.), mas também seu comportamento e seu sistema de valores e de representações (relação com a terra e com o patrimônio, relação com as técnicas e os equipamentos, relação com o mercado e a sociedade global e relação com o meio ambiente natural). Para o agricultor, a definição de estratégias específicas apropriadas à realização do seu projeto (profissional ou familiar) dependerá da interação entre dois níveis de realidade, material e imaterial ou sociocultural (Abreu et al., 2006).

Para esclarecer a posição teórica e o conceito de formas sociais de produção, há um ponto a precisar: trata-se de dar uma dimensão temporal à abordagem, não somente em relação ao passado, mas também em relação ao futuro. Cada agricultor, ou grupo de agricultores, tem origens particulares refletindo em uma história que lhe é própria e da qual extrai, em maior ou menor grau, uma parte indispensável do seu patrimônio sociocultural. Do mesmo modo, cada agricultor, ou grupo de agricultores, adota para o futuro um projeto profissional e familiar, em função do qual irá organizar todas as suas estratégias e tomar suas decisões. Está claro que o futuro desses agricultores vai depender das possibilidades ou capacidades de concretizar esse projeto que estabeleceu para si e para sua família. (Lamarche, 1994 apud Abreu, 2005). Os estudos devem assumir um compromisso com a busca do papel do uso do

trabalho familiar, ou do trabalho assalariado, e com as diferentes situações invisíveis e descartadas do trabalho de membros da família, como a esposa do chefe da unidade de produção e suas filhas ou viúvas.

A família na produção familiar quase sempre ocupa um lugar de destaque. Presente (mesmo que pouco) por todo o mundo, qualquer que seja o país, sua história e seu sistema político, socialista ou capitalista, industrializado ou em via de desenvolvimento, essa forma social de produção particular é a prova evidente de uma grande capacidade de adaptação. E é por isso que, longe de desaparecer – como se previa – a agricultura familiar toma, atualmente, uma dimensão abrangente e universal. No contexto latino-americano e talvez ainda mais no Brasil – onde essa questão do papel e do lugar da produção familiar é particularmente importante –, é necessário entender o conceito de agricultura familiar. Trata-se de uma forma social heterogênea cujas unidades de produção e modos de vida se diferenciam pela diversidade e capacidade do agricultor de se apropriar dos meios de produção e desenvolvê-los. Tal diversidade se expressa nas formas distintas de se relacionar com a terra e com o meio ambiente (Abreu, 2005; Abreu et al., 2006). A seguir, apresenta-se o amplo universo social da agricultura familiar (Tabela 9.1) que, quase em sua totalidade, foram identificados no público-alvo de pesquisas desenvolvidas pela Embrapa Meio Ambiente.

Tabela 9.1. A diversidade social da pesquisa em agricultura familiar

Produtores familiares vinculados diretamente à produção de alimentos e ao turismo rural ou ecológico	Grupos formados por populações urbanas, populações de produtores tradicionais, extrativistas
Empresas familiares consolidadas	Grupos: Indígenas
Produtores de base familiar de subsistência e atividades turísticas	Populações tradicionais: Grupos de ribeirinhos (grupos de pescadores)
Produtores de base familiar de subsistência e atividades turísticas	Populações tradicionais: Grupos de seringueiros, coletores de babaçu
Produtores familiares em estado de vulnerabilidade social	Grupos de produtores quilombolas
Assentados da reforma agrária	Grupos de produtores e, ao mesmo tempo, de atividades turísticas
Consumidores urbanos, produtores neorurais, agricultores familiares orgânicos periurbanos	Atores sociais de movimentos agroecológicos e científicos

Fonte: Adaptado de Abreu (2005).

Conforme apresentado na Tabela 9.1, em alguns dos territórios rurais estudados havia uma forte diversidade social, econômica e cultural. A organização da produção e do trabalho fica a cargo do produtor e de sua família; enquanto o trabalho assalariado, quando ocorre, é apenas complementar.

A partir da abordagem focada no aspecto econômico da produção, distintamente do que foi apresentado anteriormente, Payes e Silveira (1997) caracterizaram a racionalidade econômica do produtor familiar para entender as decisões do agricultor diante do sistema de produção. Os autores o classificam como empresário familiar pela capacidade de manter a unidade de produção através do trabalho da família e por encontrar-se vinculado aos mercados. Ou seja, segundo esses autores a unidade do agricultor familiar funciona sob condições gerais de sobrevivência no capitalismo (concorrência, concentração, etc.), o que implica em preocupar-se não apenas com o bem estar da família, mas, também – e diferentemente do camponês (forma de produção vinculado ao sistema medieval europeu) –, com a valorização patrimonial e, assim, garantir suas chances de sucesso nos mercados. Contudo, esse tipo de abordagem da racionalidade econômica é limitado – mas por quais razões? Abordar as decisões dos agricultores simplesmente considerando a lógica econômica de funcionamento das unidades produtivas não consegue captar a racionalidade da totalidade de casos empíricos, pois, em muitos casos, essas decisões estão associadas aos aspectos sociais, culturais e condições objetivas de suporte institucional. Também se deve considerar as condições dos recursos naturais, ou do meio ambiente, onde se encontra a unidade de produção familiar, tal como foi apresentado anteriormente em pesquisas desenvolvidas por Billaud e Abreu (1999).

O desafio foi construir uma metodologia de pesquisa sociológica das questões relacionadas à sustentabilidade dos sistemas de produção agropecuário, tendo como elementos centrais as representações sociais em relação ao risco ecológico e as estratégias práticas de transição para a sustentabilidade. Foram utilizadas duas abordagens, uma quantitativa (análise fatorial) e outra qualitativa, baseada em métodos da sociologia rural (Abreu, 2005).

O conceito de representação social muitas vezes é simplificado pela ideia de percepção social, mas diz respeito, precisamente, à relação entre a percepção social e práticas ou ações humanas – no caso, a relação dos agricultores com as tecnologias, práticas e recursos naturais –, ou seja, em que medida há ou não coerência entre as percepções sociais e suas ações práticas (Abreu, 2005). Portanto, a técnica da análise do discurso (percepções), dissociada das ações, não é um método adequado para captar a visão dos agricultores sob risco ecológico e suas motivações em relação às opções tecnológicas ou de manejo dos recursos naturais. Constatou-se que as motivações são fundadas em critérios ligados ao modo de gestão dos recursos naturais, à situação econômica e aos valores socioculturais.

Segundo a autora citada, o objetivo da pesquisa foi entender as diferentes formas de construção das relações dos agricultores com o meio ambiente a partir da análise de suas práticas produtivas (mobilização de técnicas, exploração dos recursos, organização e gestão dos territórios) e da relação desses agricultores com os recursos naturais: como os agentes sociais identificam as relações que estabelecem com a natureza; como veem o risco de que essas relações possam gerar problemas ambientais; e como formulam a noção de risco ou de problema ambiental.

Trata-se também de identificar possíveis mudanças em curso no mundo rural, que tomariam a forma de mudanças na representação da natureza e dos riscos associados às atividades humanas (Abreu et al., 2006).

Esse estudo, além de divulgar resultados inéditos em termos de pesquisa ambiental, também oferece contribuições teóricas preciosas para equipes que atuam no campo da sociologia rural. Além disso, apresenta subsídios práticos para a formulação de políticas públicas voltadas à gestão ambiental territorial da agropecuária e de outras atividades presentes no Vale do Ribeira paulista: uma região com baixo IDH, de grandes contrastes socioambientais e de conflitos entre os objetivos econômicos e ecológicos no manejo dos recursos naturais (Abreu, 2005).

Em termos mais específicos, a autora oferece, neste trabalho, a partir de estudos empíricos em Tapiraí, SP – onde as atividades vão desde o extrativismo de palmito até a agricultura intensiva do gengibre e sistemas orgânicos, passando pelos sistemas quase-naturais de agricultura –, contribuições fundamentais sobre as representações sociais de riscos ecológicos na agricultura, mostrando com riqueza de detalhes e de particularidades as relações da população local com o meio natural.

## Agricultura Familiar e Políticas Públicas

No Brasil, o reconhecimento institucional da importância social e econômica da agricultura familiar é tardio, pois foi somente em 1996 que se criou o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (Pronaf) (Abreu, 2000). Essa era uma antiga reivindicação das organizações dos trabalhadores rurais, que demandavam políticas específicas para o setor e legitimação por parte do Estado. Portanto, foi nas últimas décadas que o processo de democratização política promoveu o aumento da participação desses atores sociais na definição e gestão das políticas públicas. No sentido de avaliar os efeitos destas na reprodução familiar em áreas de transição ecológica, realizou-se um conjunto de estudos de casos. Observou-se que, a partir deste período, o Estado se ajustou à nova realidade com o objetivo de racionalizar as ações e ampliar os resultados das políticas sociais, mediante políticas públicas de combate à pobreza e de promoção do desenvolvimento rural. Assim as políticas de interface com o mundo rural, ganham espaço, em especial entre 2003 e 2010 (Tabela 9.2) (Abreu et al., 2014).

**Tabela 9.2.** Principais leis e decretos relacionados à produção familiar e às políticas públicas entre 1996 e 2012.

Marco legal	Descrição
Decreto nº 1.946, de 28/07/1996	Criação do Pronaf: representa a legitimação, por parte do Estado brasileiro, de uma nova categoria social, desencadeando a emergência de outras políticas diferenciadas de desenvolvimento rural.
Decreto nº 3.338 de 14/01/2000	Cria o Ministério do Desenvolvimento Agrário.
Lei nº 10.696, de 02/07/ 2003	Artigo 19 – Cria o Programa de Aquisição de Alimentos (PAA).
Decreto nº 5.033, de 05/04/2004	Regulamenta a estrutura regimental do Ministério do Desenvolvimento Agrário.
Lei nº 11.326, de 24/07/2006	Lei da Agricultura Familiar: reconhece a categoria social e estabelece os conceitos, princípios e instrumentos destinados à formulação das políticas públicas para este grupo social.
Decreto nº 11.503, de 25/02/2008	Institui o Programa Territórios da Cidadania: Busca promover e acelerar a superação da pobreza e das desigualdades sociais no meio rural, por meio da universalização de programas básicos de cidadania e de estratégia de desenvolvimento territorial sustentável.
Lei nº 12.188, de 11/01/2010	Cria a Política Nacional de Assistência Técnica e Extensão Rural para a Agricultura Familiar e Reforma Agrária (Pnater).
<b>Decreto nº 7.794, de 20/08/2012</b>	Institui a Política Nacional de Agroecologia e Produção Orgânica (Pnapo), com o objetivo de integrar, articular e adequar políticas, programas e ações indutoras da transição agroecológica e da produção orgânica e de base agroecológica.

Fonte: Gomes e Abreu (2019).

Assim, segundo Schmitt e Guimarães (2008 apud Gomes; Abreu, 2019), o papel das políticas de cunho social tem o potencial de alavancar o desenvolvimento do espaço rural por meio da geração de renda e do trabalho. Nesse contexto, os dois programas federais, PAA e Programa Nacional da Alimentação Escolar (PNAE), destacam-se nacionalmente, em termos geográficos e sociais.

Do ponto de vista da realidade concreta do produtor familiar, em diversos territórios do país, os produtos da agricultura familiar apresentam dificuldades de inserção nos mercados. Com vistas a solucionar essa problemática, como foi mostrado, um conjunto de políticas, denominadas “mercado institucional de alimentos da agricul-

tura familiar”, ou PAA e PNAE, foram criadas para o setor. Desta forma, desenvolveu-se uma pesquisa cujo objetivo foi analisar as percepções de produtores familiares e técnicos, associadas à política de compra institucional, na região paulista do Vale do Ribeira, e seus impactos sociais.

Os resultados mostraram que os programas teriam potencial para impactar positivamente a realidade desses agricultores, mas essa política apresentou limitações quanto ao alcance do público-alvo (agricultores familiares da região da área do estudo). Um dos apontamentos foi a falta de informação e de compreensão do funcionamento operacional do programa no campo da agricultura de base ecológica, além de ficar clara a necessidade de assistência técnica qualificada (Gomes; Abreu, 2019).

Assim, a pesquisa apresentou a análise de um conjunto de aspectos das percepções de atores-chave (produtores e técnicos) sobre o PAA e PNAE e caracterizou seus impactos positivos e negativos. De modo geral, os programas contribuíram para o aumento da renda familiar dos agricultores. Outro impacto positivo observado foi o estímulo à regularização documental dos agricultores. É importante que isso ocorra de alguma forma, pois este é um fator que se mostrou capaz de impulsionar o acesso dessas pessoas à política pública.

Foi observada em campo a opinião dos técnicos quanto à capacidade de promover, entre os agricultores, novas habilidades técnicas associadas aos procedimentos operacionais dos programas. Mesmo nos casos em que os agricultores não tiveram participação ou aprendizado com relação às operações documentais e administrativas associadas aos programas, eles desenvolveram novas habilidades nas fases de produção, processamento, escoamento ou ambos. Essas novas capacidades se mostraram dependentes de assistência técnica, mas também ocorreram em menor medida por conta dos próprios agricultores e, em alguns casos, permaneceram sendo praticadas independentemente dos programas.

O estímulo à transição e à produção orgânica é um impacto positivo que deve ser destacado. Porém, ainda se mostrou dependente de acompanhamento técnico para acontecer, pois há dificuldade por parte dos agricultores relacionada à falta de conhecimentos de técnicas de produção orgânica e sobre os mecanismos de garantia e certificação dessa produção. Essa dependência de assistência técnica foi um ponto levantado pelos atores da pesquisa, que mostram claramente a necessidade de solução para esse gargalo. É necessário que a assistência tenha capacidade de atender a questões não só de ordem agrônômica e de natureza agroecológica, mas também administrativas, logísticas e de relações institucionais para maior efetividade no auxílio à execução dos programas.

Os agricultores apontaram o caso da “cooperação técnica”, ou seja, uma organização de jovens agrônomos especialistas em produção orgânica e agroecologia. Esta foi avaliada como muito positiva, obtendo sucesso na operação conjunta com os agricul-

tores e suas instituições. É necessária uma investigação maior deste aspecto, identificado por eles como um tipo diferenciado de assistência técnica. Portanto, é crucial um novo modelo efetivo de assistência que satisfaça as necessidades reais dos agricultores e que possa contribuir para o sucesso das políticas públicas destinadas ao fortalecimento desta categoria social.

A incompreensão da operacionalização dos programas pela maioria dos agricultores foi um ponto observado em diferentes graus, presente em sete dos agricultores e reafirmado pelos técnicos como fato mais amplo. Os agricultores não compreendem a estrutura institucional das políticas públicas e o histórico político institucional por trás do reconhecimento e institucionalização da política pública do mercado institucional. Além disso, a operação é compreendida de maneira geral pelos agricultores como uma ação que depende de indivíduos, lideranças ou diretores de suas instituições. Isso tira o caráter de direito da política e a torna, em alguns casos, uma ferramenta de barganha política local e regional. Novamente um trabalho técnico se põe como um dos caminhos que podem ser disseminadores de informações claras das regras e funcionamento dos programas, gerando a autonomia que se espera como resultado das políticas.

Os programas tiveram acertos e falhas nos territórios selecionados da região do Vale do Ribeira. No entanto, ao não ter incluído o universo da agricultura familiar de forma abrangente, como já mencionado, marginalizou parte dos agricultores familiares presentes na região. Por outro lado, contribuiu para o aumento da renda daqueles que acessaram os programas. A questão da melhoria da renda é o ponto de interesse comum entre os agricultores mesmo em situações socioeconômicas, ambientais e produtivas diferentes, sem esquecer que a inserção nos programas potencializou o acesso à assistência técnica e a transição para a produção orgânica e agroecologia. Porém, são necessários ajustes e soluções, em essência: treinamento de assistência técnica adequada e capaz de interagir com as diversas instâncias do setor público e organizações da sociedade civil; revisão dos mecanismos que favoreçam a garantia do cumprimento da lei do PNAE por parte dos municípios, estados e união, garantindo a compra de, no mínimo, 30% da agricultura familiar para alimentação escolar; e melhorias na gestão, no monitoramento e na fiscalização da operação dos programas.

Também o PNAE se traduz numa inovação social brasileira e existe oficialmente desde 1950, mas a lei específica (Lei nº 11.947, de 16 de junho de 2009) torna a questão da alimentação como direito fundamental, igualando-a ao direito à educação pública. O fundo nacional de desenvolvimento escolar (FNDE) repassa para a compra direta dos produtos da agricultura familiar o montante de 30% do total do fundo, preferencialmente no local da produção, e paga-se um prêmio de 5% a 30% se provier da agricultura ecológica. Existem prefeituras em que 100% dos produtos da agricultura local ou regional são comprados; é o caso das cidades de Ipê e Antônio Prado, no

Rio Grande do Sul. Trata-se da criação do mercado institucional (Mattei, 2014 apud Abreu et al., 2014).

Assim, vê-se que a produção familiar tem uma forte importância social e econômica no Brasil, sendo que 80% dos produtos certificados são oriundos da agricultura familiar (Mapa, 2017). Existe uma multiplicidade de contextos locais e grupos diferenciados de produtores familiares, caracterizados por sua forte heterogeneidade tanto social e cultural, como pela diversidade de estilos de produção de base ecológica. É inquestionável a contribuição da agricultura familiar para a segurança alimentar e nutricional dos países. A importância de tal segmento social para a segurança alimentar vai além da produção primária, e envolve também a forma de distribuir a renda e gerar empregos.

Em 2003, no Dia Internacional do Meio Ambiente, a Embrapa Meio Ambiente organizou uma Conferência sobre Meio Ambiente e Inclusão Social, a fim de discutir temas prioritários para a sociedade brasileira, com ênfase nos planos e programas do governo federal, e teve como eixo central a inclusão social e o combate à fome e à pobreza. Fruto deste evento foi a produção do livro organizado por Ramos Filho (2006), *Agricultura, meio ambiente e inclusão social: questões para debate*. A obra apresenta um conjunto de ideias e contribuições a partir da experiência de especialistas do governo, da comunidade acadêmica e do terceiro setor para discutir questões objetivas, que permitem tratar concretamente da questão da inclusão social a partir das áreas rurais. As seguintes questões levaram a problematização: Que tipo de desenvolvimento? Para incluir quais grupos sociais? Que programas e projetos teremos que construir? E com que arranjos institucionais e quais os atores sociais necessários para desenvolvê-los com sucesso? Decorridos mais de 18 anos da realização do evento, o debate ali desenvolvido permanece atual. Há problemas históricos, como a situação de insegurança alimentar em que vive expressiva camada da população brasileira; persistente concentração econômica da renda agrícola; exclusão social rural e urbana; e, igualmente, concentração da estrutura fundiária. A crise ambiental e as mudanças climáticas e suas consequências sobre o ambiente, a sociedade, a economia e as demandas sociais por qualidade ambiental são questões antigas, mas que continuam bastante atuais.

Igualmente na obra, os autores Ramos e Aly Junior (2005) promovem uma reflexão científica com especialistas do campo socioeconômico, aprofundando a discussão especificamente na questão agrária, visando obter um panorama da realidade agrária paulista, além de levantar aspectos que possibilitam a formulação de políticas fundiárias para enfrentar o crescente desafio da exclusão social, em particular no estado de São Paulo.

## Agricultura Familiar e a Transição Ecológica

O desenvolvimento da agricultura orgânica no Brasil tem múltiplas formas. Além de um nicho de mercado ou de uma oportunidade de exportação, consiste numa prática social alternativa, que recria espaços de produção e novas relações entre produtores, mercado e consumidores. Por meio de suas experiências com a agricultura orgânica, em uma comunidade próxima a três metrópoles, horticultores familiares de Ibiúna, SP, criaram entidades coletivas e experimentaram novas práticas sociais. O estudo conduzido por Bellon e Abreu (2005) mostrou como esses minifúndios foram organizados para desenvolver agricultura orgânica e responder a diversos objetivos. Com base nas entrevistas e nas observações de campo, foram consideradas as formas concretas de organização e de desenvolvimento da agricultura orgânica. No primeiro momento, foram apresentados os desafios da agricultura orgânica em Ibiúna; em seguida, caracterizou-se o desenvolvimento da agricultura orgânica como projeto social, o qual estabelece interações entre a economia e o meio ambiente no território do município. Na terceira parte, foram identificadas as quatro formas sociais de organização, a dinâmica de funcionamento, os valores sociais e culturais e suas inter-relações. Por fim, foram discutidos os elementos suscetíveis de garantir a reprodução social e de fortalecer novas vias de desenvolvimento (Bellon; Abreu, 2005).

Em outra pesquisa, investigou-se a relação entre agroecologia e agricultura orgânica. Em alguns países, o debate na comunidade científica e a análise das posições, ou discursos, de pesquisadores e artigos apontam para distintas combinações, trocas e interações entre a agricultura orgânica e agroecologia. Além disso, apresentou-se uma síntese de um estudo empírico para ilustrar o debate sobre a aplicação prática de princípios da agroecologia, avaliando práticas e valores éticos, relacionando-os com as lógicas familiares ou patronais de funcionamento da produção. Finalmente, propõem um quadro analítico geral (Tabela 9.3) para confrontar agricultura orgânica e agroecologia. As relações entre modos de produção não podem ser reduzidas a uma simples oposição entre um campo científico e um domínio prático. Segundo esses autores, a crítica centra-se, sobretudo, na visão minimalista da agricultura orgânica, na medida em que ela é vista como substituição simples de insumos, em detrimento do redesenho dos sistemas agrícolas, e praticada segundo a lógica organizacional da moderna agricultura convencional. Diversos elementos devem ser levados em conta, entre eles o grau de integração sociocultural (valores) à sociedade, às práticas e a inserção no mercado. Estudos no território brasileiro exemplificam a diversidade de relações existentes, seja inclusiva ou exclusiva (Abreu et al., 2012).

Tabela 9.3. Análise comparativa da relação entre agricultura orgânica e agroecologia.

	Agricultura orgânica	Agroecologia
Paradigmas	Princípios da International Federation of Organic Agriculture Movements (IFOAM): paradigma ciências do solo	Conceitos científicos, da entomologia e da ecologia
Definição	Agricultura Orgânica é um sistema de produção que sustenta a saúde dos solos, dos ecossistemas e das pessoas. Baseia-se em processos ecológicos, biodiversidade e ciclos adaptados às condições locais, e não utiliza insumos com efeitos adversos. A Agricultura Orgânica combina tradição, inovação e ciência para beneficiar o ambiente e promover relações justas e boa qualidade de vida para todos os envolvidos. <a href="https://www.ifoam.bio/why-organic/organic-landmarks/definition-organic">https://www.ifoam.bio/why-organic/organic-landmarks/definition-organic</a> . Acesso em 26/03/2023	Estudo interdisciplinar e redesenho de sistemas agrícolas e agroalimentares Gliessman, 1999
Princípios	Ifoam, 2008 1) Saúde 2) Ecologia 3) Equidade 4) Cuidados Preventivos Proteção das Futuras Gerações <a href="https://www.ifoam.bio/why-organic/shaping-agriculture/four-principles-organic">https://www.ifoam.bio/why-organic/shaping-agriculture/four-principles-organic</a> . Acesso em 26/03/2023	Gliessman, 1999 1) Baixa dependência de inputs externos 2) Uso de recursos naturais renováveis 3) Mínimo de impacto adverso ao meio ambiente 4) Manutenção da capacidade produtiva 5) Diversidade biológica e cultural 6) Conhecimento da população local 7) Satisfação das necessidades humanas

Continua...

Tabela 9.3. Continuação.

	Agricultura orgânica	Agroecologia
Conceitos de referências	Sistemas de produção; cadeias de valores	Agroecossistemas e soberania alimentar
Atores-chave	Produtores, consumidores, processos e certificadores	Diversidade de produtores familiares e na relação com consumidores
Modelos de referências	Sistemas integrados de policultivo e gado; horticultura periurbana; Biodinâmica, Orgânica, Ecológica	Sistemas tradicionais multiestratificados. Iniciativas de sistematização de experiências agroecológicas contemporâneas
Perspectiva de mudança	Focaliza a conversão dos produtores e suas redes profissionais de proximidade	Focaliza sobre os níveis de transição: racionalização, substituição e redesenho. (ERS) e sua inserção em sistemas agroalimentares
Tecnologias	Uso de substâncias naturais e o não uso de transgênicos	Ciclo de nutrientes, práticas de proteção vegetal e possibilidades de uso de produtos químicos
Biodiversidade	Impacto orientado (efeito das práticas sobre biodiversidade)	Recursos orientados (valorização da biodiversidade como fator da produção)
Alimentação	Qualidade dos produtos, saúde dos consumidores	Sistemas agroalimentares e soberania alimentar
Normas de produção	Regras de produção aceitas internacional e nacionalmente	Sem padrão internacional, regras aceitas localmente
Certificação	Predomínio da certificação por terceira parte (auditoria) atestada com selos	Sistemas de garantia participativos, vendas diretas com controle social

Fonte: Abreu et al. (2012).

Um conjunto de parâmetros foi selecionado para comparar a agricultura orgânica e a agroecologia. Resumidamente, trata-se de elementos discutidos anteriormente que possibilitam a identificação e apresentação das características. Entretanto, é válido lembrar que o esquema representa uma simplificação da realidade, visto que cada experiência é sempre singular.

Com sua recente expansão global, novos desafios têm sido levantados para a agricultura orgânica, particularmente para as práticas de manejo em fazendas orgânicas estão sujeitas às forças da convencionalidade, ou seja, a unidade de produção simplesmente promove a substituição de insumos sem avançar em novas etapas da transição. Nesta pesquisa, foram investigadas as mudanças associadas às práticas agroecológicas em fazendas orgânicas certificadas na China, Brasil e Egito. O estudo parte da hipótese de tendência a normatização da agricultura orgânica e adota os princípios orgânicos e agroecológicos como parâmetros para a análise do fenômeno. Centra-se nos princípios do design agroecológico, inerentes à transição, avalia a diversidade da produção agrícola, o manejo de pragas, das doenças, das ervas daninhas e da fertilidade do solo. A pesquisa ocorreu em cinco casos, nos países mencionados anteriormente (Oelofse, et al., 2011).

Os resultados mostraram que a adoção da agricultura orgânica tem induzido mudanças na escolha das práticas do sistema de produção, embora as práticas adotadas não correspondam aos princípios orgânicos preconizados. As forças de normatização exercem uma forte influência nessas mudanças, em particular em culturas de mercado de “nicho” do orgânico. Essas culturas de mercado influenciam as decisões dos agricultores orgânicos, particularmente em relação à priorização da diversidade nos sistemas para fins de recuperação ecológica. Os sistemas agrícolas não sofreram, portanto, grandes mudanças em seus padrões de cultivo. Além disso, houve uma forte dependência de substituição de insumos para controle de pragas e para repor a fertilidade do solo. Este estudo apresenta, portanto, novos dados e uma nova análise das implicações da escala agrícola global, da expansão da agricultura orgânica e da influência da normatização nas práticas dos agricultores (Oelofse et al., 2011).

Foram desenvolvidos três estudos de casos na China e no Brasil, em uma investigação de comparação internacional, denominada “Certified organic agriculture in China and Brazil: Market accessibility and outcomes following adoption”<sup>1</sup>. Nela, exploraram-se as formas de transição de sistemas de produção orgânica certificada e

---

<sup>1</sup> Com base em três estudos de casos na China e no Brasil, o artigo explora as formas de acesso dos agricultores e a participação na agricultura orgânica certificada (AO) e investiga a influência da adoção da AO na produtividade, orçamentos de nutrientes, renda e no uso de mão de obra.

investigou-se a influência desta mudança na produtividade, orçamentos de nutrientes, renda e uso de trabalho. Os agricultores de pequena escala que se convertem ao sistema orgânico requerem uma quantidade significativa de recursos externos relacionados à produção, marketing e suporte à certificação. Ainda com base em estudos de caso na China e no Brasil, exploraram-se os termos de acesso dos agricultores e a participação na agricultura orgânica certificada. Também foi investigada a influência da adoção na produtividade, orçamentos de nutrientes, rendimentos e utilização de mão-de-obra. O acesso à agricultura orgânica estava dependendo fortemente do tipo de apoio disponível para os agricultores. A agricultura orgânica baseada em um modelo de contrato por cultivo resultou em apenas uma única opção disponível para um grupo restrito de agricultores, enquanto a agricultura orgânica associada a uma cooperativa de agricultores forneceu melhor desenvolvimento. Nesta, a produção bruta foi significativamente maior para as laranjas, enquanto, para as outras culturas, a produção bruta foi semelhante (Oelofse, M. et al. 2010).

No entanto, segundo os autores citados acima, os agricultores orgânicos na China sentiram que a adoção dos sistemas orgânicos contribuía para a melhoria de preços, da renda e do acesso ao mercado. A percepção dos agricultores de melhores rendimentos provavelmente se deve ao acesso para mercado especializado, junto com uma grande base de produção, intensificação e diversificação da produção. Assim, a agricultura orgânica pode ser um caminho de desenvolvimento para agricultores familiares se as estruturas de apoio forem fornecidas a uma pequena taxa de juros financeiros (Oelofse et al., 2010).

Oelofse et al. (2010) sublinham a necessidade de avaliarmos se as mudanças de práticas nas explorações agrícolas orgânicas obedecem aos valores e princípios inerentes à agricultura orgânica. Os resultados apresentados nesta investigação proporcionam novos conhecimentos sobre os tipos de mudanças que podem ocorrer em termos de práticas agrícolas em cadeias de alimentos orgânicos globais.

A reformulação do Ifoam orgânico baseada na definição de um conjunto de princípios é uma tentativa aberta de acomodar os desafios da globalização da agricultura orgânica. A análise mostra que, embora os agricultores orgânicos respeitem as regras decorrentes da legislação, existe uma lacuna entre o que adotam e as normas e os princípios orgânicos. A aplicação destas práticas torna-se, assim, uma decisão do agricultor – a questão é se mais regras baseadas em princípios são viáveis, ou se outras opções serão desejáveis para regulamentação futura.

O mercado de produtos orgânicos certificados é crescente e dá origem ao debate sobre os possíveis impactos ambientais, tanto os que podem ocorrer durante a produção quanto durante o transporte. No caso específico dos sucos de laranjas orgânicas (*Citrus sinensis*) produzidas por agricultores familiares no Brasil e processadas e importadas pela Dinamarca. Tais impactos foram avaliados com base em estudo

de caso, utilizando a abordagem de ciclo de vida (Knudsen et al., 2011). Além disso, a produção de laranjas orgânicas em pequena escala foi comparada com aquelas do sistema de produção orgânica convencional de pequena e grande escala em Itápolis, SP.

O transporte do suco de laranja orgânico de pequenos agricultores brasileiros, importado pela Dinamarca, foi o principal contribuinte (58%) para as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no ciclo de vida do produto, especialmente o transporte por caminhão de laranjas frescas do Brasil e o suco de laranja reconstituído na Europa, seguidos pelas práticas agrícolas (23%) (Knudsen et al., 2011).

A utilização de energia não renovável por hectare foi significativamente mais baixa nas pequenas explorações agrícolas de agricultura orgânica do que no sistema convencional, com um padrão semelhante ao potencial global de aquecimento e eutrofização, incluindo o sequestro de carbono do solo em plantações orgânicas, que alargou a diferença do potencial de aquecimento global entre orgânicos e convencional. As pequenas unidades de produção orgânicas possuíam maior diversidade de culturas em relação ao convencional, o que pode ter um efeito positivo na biodiversidade, junto com a espontaneidade da vegetação entre as laranjeiras orgânicas e a ausência de pesticidas tóxicos. Comparando a pequena escala com produção de laranja orgânica em grande escala, a diversidade de culturas foi mais elevada nas pequenas explorações agrícolas, enquanto o potencial de aquecimento global, de eutrofização e utilização do cobre por hectare eram significativamente inferiores, indicando que os impactos ambientais em pequena escala diferem das explorações orgânicas em grande escala. Esse foi mais um dos trabalhos desenvolvidos em cooperação entre pesquisadores dinamarqueses e brasileiros.

Um dos primeiros trabalhos em parceria com a pós-graduação da UFSCar diz respeito ao estudo das estratégias produtivas de unidades certificadas de uma cooperativa de agricultores familiares de Itápolis, SP. Verificou-se nessas unidades a aplicação de princípios da agroecologia recomendados pela agricultura de base ecológica, em observância à agrobiodiversidade, à reciclagem de material e aos aspectos socioeconômicos do processo de conversão e transição agroecológica. A pesquisa se desenvolveu por meio da complementaridade de abordagens proporcionada pela combinação de métodos de pesquisa sociológica e agrônômica, com base na realização de entrevistas qualitativas e na aplicação de questionários com questões semiestruturadas. Concluiu-se que o estabelecimento de relações econômicas entre a cooperativa e uma entidade internacional de comércio tem estimulado o aumento expressivo na diversificação produtiva e na aplicação de princípios da agricultura de base ecológica, assim como tem proporcionado uma visível mudança de atitude quanto à exploração dos recursos naturais da região, localizada em uma das bacias hidrográficas mais degradadas do estado de São Paulo, em razão da poluição por agroquímicos e pesticidas, além da ausência de matas nativas (Almeida; Abreu, 2009).

Em seguida, dentro desta parceria e temática da transição de base ecológica, buscou-se contribuir com a discussão sobre a sustentabilidade da agricultura familiar brasileira por meio da reconstrução das trajetórias de transição de produtores familiares e da construção de indicadores sociais de sustentabilidade, baseado em princípios participativos. O estudo de caso foi realizado na comunidade rural do Verava, município de Ibiúna, SP, onde agricultores familiares aderiram ao modo de produção de base ecológica, motivados pela necessidade de melhoria das condições de renda. Para entender esse processo, foram reconstruídas as trajetórias de transição em períodos distintos, identificando e caracterizando os indicadores sociais de sustentabilidade, para integrar na análise a visão dos agricultores do universo da pesquisa. Tal abordagem permitiu captar a dinâmica, os momentos chave do processo de transição, os avanços e os desafios no âmbito do desenvolvimento local. A pesquisa gerou um conjunto de conhecimentos que poderão servir de subsídio para a formulação de políticas públicas (Kerber; Abreu, 2010).

Um dos estudos de caso teve como objetivo analisar a diversidade da produção e a comercialização da produção de alimentos orgânicos em Vitória, ES. Essa pesquisa se insere no bojo da temática do desenvolvimento da agricultura orgânica e da agroecologia, analisada a partir da abordagem da sociologia compreensiva. Foram analisados diversos aspectos da agricultura orgânica no estado do Espírito Santo, incluindo: sistematização dos dados estatísticos existentes; avaliação da comercialização de seus produtos, dos principais pontos de vendas e dos fornecedores da cidade de Vitória; diversidade da produção e dos preços; e a forma como o mercado valoriza a produção local, fortalece a produção familiar ecológica e a soberania alimentar.

O resultado da pesquisa confirma a hipótese principal da investigação, de que os produtos orgânicos são comercializados por vendas diretas e indiretas. Dentre os canais de comercialização avaliados, foram as feiras livres de produtos orgânicos que apresentaram a maior diversidade de produtos, além do menor preço. Tal configuração valoriza a produção familiar orgânica, promove o empoderamento dos produtores e facilita o acesso à alimentação saudável para o consumidor local (Spósito; Abreu, 2017).

## **Redes Agroalimentares, Novas Relações de Produção e Consumo e Inovação Social**

A temática das redes agroalimentares foi fruto de atividades de pesquisas que integraram o projeto Agroecologia na França e no Brasil: entre Redes Científicas, Movimentos Sociais e Políticas Públicas, apoiado pelo acordo entre a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e o Comitê Francês de Avalia-

ção da Cooperação Universitária com o Brasil (Cofecub) nº 716/2011, conduzido pela Embrapa Meio Ambiente.

Os trabalhos buscavam compreender a trajetória do desenvolvimento da agroecologia e da agricultura de base ecológica no Brasil e na França. Segundo Abreu et al. (2020), na década de 1970, emergiram novos estilos de produção ecológica, em oposição ao modelo de agricultura convencional, apoiados por organizações não governamentais (ONGs) e por profissionais especialmente das ciências agrárias. No Brasil, evoluiu progressivamente sob a influência do guia conceitual da agroecologia, contudo, essa evolução foi mais tardia na França. O objetivo da investigação foi descrever as características, os elementos históricos e determinantes da dinâmica de desenvolvimento da agroecologia no Brasil e na França, a fim de desvendar suas diferentes concepções para, então, analisar as controvérsias. O trabalho mostra o lugar central que a agroecologia ocupa no debate científico onde a questão alimentar, a relação com o meio ambiente, a biodiversidade (funcionalidades dos agroecossistemas) e o campo social são cruciais, provocando a redefinição do sistema de ecologização da agricultura.

O atual sistema agroalimentar convencional abriu espaço para a transição da agricultura em direção à adoção de sistemas agroalimentares alternativos, considerados mais justos e sustentáveis, com adoção de princípios da agroecologia (Abreu et al., 2012). Tais sistemas vêm sendo construídos em redes territoriais alternativas de produção e consumo, em regiões onde a questão alimentar é protagonizada por agricultores familiares, agentes de desenvolvimento e consumidores, especialmente em regiões próximas de grandes metrópoles – o que ocorre em diferentes regiões do globo e na América Latina (Abreu; Bellon, 2013).

As redes alimentares alternativas, como são conhecidas na literatura internacional, constituem uma categoria genérica de análise para o estudo de alternativas ao modelo agroalimentar denominado industrial. Essas redes têm algumas características centrais que incluem: cooperação social e parcerias entre produtores e consumidores; reconexão entre produção e consumo dentro de padrões sustentáveis; dinamização de mercados locais com identidade territorial e revalorização da circulação de produtos de qualidade diferenciada, como é o caso de produtos de base ecológica.

Essas redes e movimentos sociais favoreceram a reinserção econômica de agricultores familiares brasileiros, excluídos do processo de modernização agrícola. A institucionalização das redes e movimentos de base ecológica aconteceu na França nos anos 1980 e, no Brasil, nos anos 1990, pautado em princípios de confiança, equidade e novas relações sociais entre produtores e consumidores, que contribuem para a emergência de uma democracia alimentar fundada sobre a racionalidade socioambiental.

As redes alimentares alternativas são muito diversas e privilegiam os circuitos curtos (CCs) de comercialização (feiras do produtor, entrega de cestas, pequenas lojas

de produtores, venda na propriedade ligada ao agroturismo, venda institucional para alimentação escolar, entre outras formas de venda direta). O mais importante para caracterizar um CC ou cadeia curta é o fato de um produto chegar às mãos do consumidor com informações que lhe permitam saber onde foi produzido (lugar), por quem (produtor) e de que forma (sistema de produção). Entretanto, é necessária uma análise crítica que busque avaliar as relações de poder e a distribuição social dos ganhos entre os atores envolvidos.

A literatura internacional sobre a temática indica que um dos principais questionamentos levantados é a capacidade dessas redes alimentares alternativas de gerar mudanças estruturais em uma escala maior (Goodman, 2003; Deverre; Lamine, 2010 apud Darolt et al., 2016). Segundo os autores, as redes podem contribuir para uma transformação das relações de poder no âmbito dos sistemas alimentares, incluindo um maior peso e participação de consumidores e produtores na definição dos modos de produção, troca e consumo (a noção de autonomia). Nesse sentido, os movimentos sociais adotam diferentes estratégias para tornar os cidadãos mais ativos, como: a construção de formas alternativas de compra e troca; investimento em educação do consumidor; campanhas de conscientização, etc.

A educação para o consumo consciente é um desafio na perspectiva de requalificar os consumidores em oposição à aceitação e à conformidade aos alimentos ofertados pelo sistema convencional. O aprendizado proporcionado por essas redes alternativas de comercialização, que consideram as práticas agrícolas e seus impactos, as práticas culinárias e as práticas democráticas em si, envolvendo pessoas e instituições, são fontes de empoderamento dos consumidores, contribuindo para torná-los cidadãos conscientes de sua alimentação, ou consumidores cidadãos.

Do lado dos produtores, acrescentam que os agricultores ecológicos inseridos em um movimento social organizado contribuem para a ecologização de um rural que se situa para além das práticas agrícolas. Nesse caso, recuperam-se os interesses individuais dos agricultores, transformando-os em projetos coletivos e apontando para uma racionalidade socioambiental. Alguns trabalhos questionam as possibilidades e limitações das redes alternativas para superar as desigualdades sociais entre produtores e consumidores. Outros discutem as possibilidades de as populações vulneráveis terem acesso a alimentação de qualidade via CCs. Para garantir uma visão de equidade numa perspectiva de segurança alimentar, vários autores têm demonstrado o papel crucial da sociedade civil e as inovações sociais que emergem dessas experiências em termos de tomada de decisão e modelos de gestão participativa. Alguns estudos apontam ainda para a noção de agricultura cidadã e de democracia alimentar (Abreu, et al., 2019).

O que se pretendeu discutir nessa pesquisa por meio de experiências francesas e brasileiras é que as redes alimentares alternativas trazem inovações sociais, diversidade e valores associados que podem contribuir para a reconexão entre produção e con-

sumo, valorizar os mercados locais por meio de CCs de comercialização e facilitar a transição para sistemas de produção e consumo mais sustentáveis (Darolt et al., 2016).

Mostrou-se que o desenvolvimento da agricultura familiar de base ecológica é potencializado quando associado a CCs e redes alimentares alternativas, complementado por parcerias e políticas públicas voltadas ao fortalecimento dessas iniciativas (Darolt et al., 2016). Enfim, o trabalho citado analisa as particularidades das redes alternativas de comercialização de produtos ecológicos e as relações produção-consumo na França e no Brasil. Para isso apresentou uma tipologia desses CCs, como funcionam, as principais características, as oportunidades e as dificuldades para produtores e consumidores.

Como resultado, a pesquisa destaca, do lado francês, a organização de agricultores para a venda direta em pontos de venda coletiva (PVC) e em redes que integram agroturismo, gastronomia, lazer, pousada e venda de produtos na propriedade (Accueil Paysan; Bienvenue à la Ferme). Ainda se destaca a organização francesa de consumidores via Associação para Manutenção de uma Agricultura Camponesa (Amap) como referência para o Brasil.

De outro lado, a experiência do circuito de comercialização da Rede Ecovida de Agroecologia, as feiras agroecológicas e as vendas de produtos ecológicos via sistema de certificação participativa podem ser consideradas como referência para o lado brasileiro.

Tem-se demonstrado que as características da produção ecológica em ambos os países (pequenas áreas, mão de obra familiar, produção diversificada, autonomia do agricultor, qualidade biológica, preservação da biodiversidade) associadas ao CC trazem impactos positivos sobre a economia local, a vida social (relação produtor-consumidor), os recursos naturais e a paisagem.

Em ambos os países, as iniciativas bem-sucedidas em CCs acontecem em locais onde existem formas de coordenação em rede e parcerias entre o poder público, entidades não-governamentais, empresas, organizações de agricultores e consumidores. Na França e no Brasil, os CCs continuam a se desenvolver com entrada significativa de alimentos ecológicos via programas governamentais nos restaurantes coletivos (cozinhas industriais, hospitais, empresas), na alimentação escolar (creches e escolas) e atendimento de pessoas em situação de risco alimentar, no caso do Brasil.

Essas redes sociais favoreceram a reinserção econômica de agricultores familiares, especialmente os excluídos do processo de modernização agrícola. A institucionalização das redes sociais de base ecológica aconteceu em vários países desde os anos 1980 e, no Brasil, nos anos 1990, pautado em princípios de confiança, equidade e novas relações sociais entre produtores e consumidores (Darolt et al., 2016).

A Embrapa Meio Ambiente desenvolveu vários outros estudos em parcerias com outras instituições nacionais e internacionais, buscando compreender essas novas

formas de interação da produção e do consumo, identificadas em vários continentes, e as características gerais destas redes agroalimentares alternativas cuja configuração é uma resposta social à crise do sistema ambiental que ocorre em diferentes partes do mundo. (Abreu; Watanabe, 2016).

A importância agroecológica e ambiental da Amazônia para o equilíbrio do clima e biodiversidade é mundialmente reconhecida. Porém, pouco se discute a respeito dos usos dos recursos naturais pela população regional ou a conservação ambiental, a agrobiodiversidade e a segurança alimentar. Buscando investigar essa problemática, uma pesquisa da Embrapa Meio Ambiente focalizou agricultores familiares da região sul da Amazônia, seus desafios e estratégias para inovação agroecológica de sistemas de produção. Isso ocorreu mais precisamente entre o final de 2007 e 2016, em Ouro Preto do Oeste, RO. Inicialmente foram entrevistados 29 agricultores de base ecológica; depois, com visitas e contatos com produtores e agentes locais, acompanhou-se a experiência e atualizaram-se os dados da pesquisa. Assim, objetivou-se com este trabalho avaliar as potencialidades da diversificação agroecológica das atividades pela comparação do que cultivavam e criavam e o que poderiam cultivar e criar conforme as espécies existentes e as espécies já pesquisadas para região, analisando os desafios para a produção oriunda dessas atividades. A comparação mostra que, apesar do avanço e consolidação em termos de desenvolvimento de sistemas agroflorestais, há ainda amplo espaço para a inovação e a diversificação agroecológica das atividades pelos agricultores. Atualmente, há múltiplas entidades públicas e privadas na região que oferecem assistência técnica; contudo, nem todos os agricultores têm acesso a esses serviços e a qualidade técnica exigida para a condução de sistemas agroflorestais precisa ser adequada aos princípios da agroecologia, demanda crucial dos agricultores familiares, tratando-se de requisito para o desenvolvimento sustentável local. Conclui-se que as transformações em curso são fruto de inovações sociais em redes de construção de novas práticas em sistemas agroalimentares.

Existe grande diferença entre o número de espécies cultivadas/criadas e o número de espécies existentes e as pesquisadas para as condições de Rondônia, havendo, assim, espaço para a inovação baseada na diversificação agroecológica das atividades de olericultura, fruticultura, sistemas agroflorestais, cultivo de plantas medicinais, piscicultura e apicultura ou meliponicultura (Abreu; Watanabe, 2016).

O desenvolvimento sustentável do território rural de Ouro Preto do Oeste, RO, dependerá em grande parte da consolidação das alternativas de produção agroflorestal de políticas para a gestão ambiental integrada, sendo fundamental ampliar e fortalecer a capacidade institucional em aprimorar e consolidar políticas locais de base sustentável para a agricultura familiar.

Para Saravalle e Abreu (2017), apesar da atual importância da problemática relacionada às redes sociotécnicas e o fortalecimento de núcleos de agroecologia, até

o momento essa temática foi pouco estudada. A pesquisa de rede sociotécnica teve como objetivos: 1) caracterizar o universo social da rede do Núcleo Apetê Caapuã da UFSCar; e 2) avaliar, por meio das percepções do grupo, as políticas públicas de incentivo à agroecologia, em especial dos Núcleos de Estudos em Agroecologia (NEAs). Foram sistematizados os projetos desenvolvidos pelo grupo a partir dos editais do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Programa de Educação Tutorial (PET), Programa de Extensão Universitária (Proext) e Pró-Reitoria de Extensão (ProEx), além da identificação das percepções dos sujeitos envolvidos sobre o conjunto de ações práticas que expressam a importância das atividades de Assistência Técnica e Extensão Rural (Ater) e da construção do conhecimento agroecológico pelo grupo. Conclui-se que apenas os editais de NEAs não são suficientes para a manutenção do Núcleo, sendo importante a articulação entre as políticas com o PET, Programa Nacional de Educação na Reforma Agrária (Pronea), editais CNPq e outros órgãos para a sustentabilidade da rede. Os principais desafios apontados são o tempo insuficiente dos projetos para a transição agroecológica das unidades de produção familiar, além da pouca disponibilidade de recursos para a contratação de profissionais formados em Ater, com conhecimento especializado no tema da transição ecológica (manejos e práticas agroecológicas), organização e inserção da produção em mercados alternativos e na operacionalização de políticas públicas.

### **Outros temas que perpassam o universo da pesquisa em agricultura familiar**

Este tópico apresenta uma contribuição da Embrapa, em parceria com outras instituições, envolvendo mulheres agricultoras do sul da Amazônia, que auxiliam no alcance de ações que buscam acabar com todas as formas de discriminação contra todas as mulheres e apoiar as reformas para dar às mulheres rurais direitos iguais no acesso aos recursos econômicos. A construção da soberania alimentar e a defesa da biodiversidade são tarefas que exigem uma ação determinada, em que se insere a proteção e conservação da vida e da natureza, trabalho predominantemente desenvolvido por mulheres. Com esse trabalho, elas sustentam a vida humana assegurando o suprimento de alimento e água, e, por isso, são as mulheres aquelas que mais sentem a destruição da integridade dos ecossistemas florestais. As mulheres da região de Ouro Preto do Oeste, RO, depois da conversão para a agricultura ecológica, passaram a produzir alimentos a partir da diversificação da produção, com preservação da biodiversidade e geração de renda familiar, cujas práticas foram pautadas no uso, no manejo e na gestão sustentável das terras. Isso ocorreu a partir de ações de ONGs do estado de Rondônia, do governo federal e da Embrapa por meio do Programa de Desenvolvimento Socioambiental da Produção Familiar Rural (Proambiente).

Nesse contexto, inserem-se o conhecimento, a utilização e a redefinição de práticas tradicionais e modernas de natureza ecológica, processos de agregação de valor à produção e resgate da gastronomia local. As ações da Embrapa em articulação com outras instituições contribuíram para dar visibilidade, ressignificar práticas e produtos agrícolas pela troca de conhecimentos sobre processos de transição de base ecológica, de agregação de valor à produção e sua inserção em diferentes modalidades de CCs (Abreu, 2010).

Trata-se de uma síntese do conjunto das atividades desenvolvidas pela Embrapa Meio Ambiente no contexto do projeto Proambiente, cujas ações foram articuladas e operacionalizadas a partir de interações múltiplas com instituições municipais, estaduais e o governo federal. Em 2005, foram desenvolvidas as primeiras atividades em parceria com a Embrapa Amazônia Oriental e depois em interação com a Embrapa Acre e Embrapa Rondônia, vinculados à agronomia e à sociologia rural; e, em 2014, as informações foram complementadas (Abreu; Watanabe, 2016). A pesquisa tanto apoiou as atividades da política pública que estavam sendo desenvolvidas quanto possibilitou dar visibilidade à experiência original do grupo de mulheres, além de gerar conhecimentos para a formulação de novas políticas públicas para o seu fortalecimento. A pesquisa foi articulada com a política pública Proambiente (2010).

A partir de 2005, coube à equipe da Embrapa Meio Ambiente – um dos braços da pesquisa do Proambiente – realizar o diagnóstico social da percepção ambiental, em áreas de sistemas de produção em transição ecológica da região de Ouro Preto do Oeste, RO.

Nesse diagnóstico, foi caracterizado o nascente protagonismo das mulheres decorrente da transição estimulada por esse programa governamental, fato que levou à continuidade do trabalho de pesquisa e desenvolvimento na região, no sentido de compreender o protagonismo das mulheres relacionado à produção de alimentos (Watanabe; Abreu, 2010; Abreu; Watanabe, 2018).

Uma pesquisa foi realizada na área de assentamento Sepé Tiaraju, que se localiza entre os municípios de Serrana e Serra Azul, cerca de 30 km do município de Ribeirão Preto, no estado de São Paulo, sobre a implantação de sistemas agroflorestais. Segundo os autores, os sistemas agroflorestais podem ser definidos, de modo geral, como o plantio conjunto de espécies arbóreas e arbustivas, nativas e exóticas, frutíferas e cultivos anuais numa mesma área, de forma a criar um sistema complexo com grande produção de biomassa e manutenção da fertilidade pelo manejo da matéria orgânica e ciclagem dos nutrientes. Algumas dessas experiências foram mapeadas com o uso da ferramenta AutoCAD, para facilitar seu monitoramento por técnicos e agricultores; ao mesmo tempo, foram elaboradas cartilhas personalizadas com as características e usos das principais espécies que o agricultor tem no seu sistema (Camargo et al., 2018). O projeto de extensão universitária cumpriu com o objetivo de gerar mapas que retratam a lógica dos sistemas agroflorestais. Essa ferramenta visa auxiliar produtores

e técnicos no monitoramento da sucessão de espécies no sistema, ajustando o mapa conforme a sua substituição. Auxiliam também os produtores na identificação das espécies com as quais estão menos familiarizados. Já as cartilhas fornecem informações básicas sobre as espécies que o produtor efetivamente tem no lote, facilitando o manejo e ampliando as possibilidades de uso dessas plantas.

Uma outra experiência de pesquisa vinculada aos agricultores familiares agrofloreais do assentamento Sepé Tiaraju enfatizou a importância da construção coletiva na formação de agricultores multiplicadores, pois são eles que promovem a apropriação e disseminação na comunidade. A própria comunidade já começa a disseminar suas experiências e influenciam agricultores de outros assentamentos da região, como os de Ribeirão Preto, SP (Nobre et al., 2011).

O tema das dinâmicas territoriais da agricultura, estudado por Silveira e Marques (2009), salienta que as contribuições da agricultura familiar são essenciais para o estudo da multifuncionalidade da agricultura e para o entendimento das dinâmicas territoriais; assim, com esses objetivos gerais, desenvolveram pesquisa no sul mineiro em projetos coletivos selecionados em três municípios vizinhos – Poço Fundo, Machado e Campestre, MG –, locais onde se concentra importante produção cafeeira com qualidade reconhecida no país. Trata-se de produção familiar cultivada em áreas de montanha. Afirmam que:

O trabalho leva em conta que o café é, efetivamente, responsável pela emergência de uma significativa identidade territorial e destaca, ademais, que o potencial socioeconômico da produção familiar local pode se traduzir em um trunfo vigoroso, desde que fundado nas relações particulares desta forma de produzir com a natureza, as quais, potencialmente, favorecem o reconhecimento das múltiplas funções da agricultura. Estas últimas concepções de desenvolvimento, principalmente quando associadas às preocupações com o equilíbrio da ocupação territorial, com a criação de empregos, com a garantia de geração de renda para a reprodução social da agricultura familiar e com o desenvolvimento de um saber ambiental específico, centrado, neste caso, no sistema orgânico de produção. O relevante potencial turístico do território, caracterizado pela forte variação de paisagem, pelo referido patrimônio alimentar e pela privilegiada localização geográfica, próxima ao eixo Belo Horizonte-São Paulo-Rio de Janeiro, torna a região em questão um lugar privilegiado para o descanso e para a recreação daqueles que habitam nessas grandes regiões metropolitanas. (Silveira; Marques, 2009).

Porém, os propósitos dos estudos sempre enfatizaram mais outros termos, como “indicadores”, “sustentabilidade”, “impactos” ou “tecnologia”, entre outros tópicos, tendo sido a menção a “agricultura familiar” antes uma contingência do estudo de caso, ou de ordem amostral, mas não temática.

O aumento da produção e comércio de alimentos orgânicos no mundo tem sido provocado por fatores-chave como: demanda dos consumidores urbanos, crescente

consciência da sociedade sobre os problemas ambientais e, em especial, pela preocupação das pessoas quanto à saúde (Abreu et al., 2009). Uma pesquisa em feiras livres de produtos orgânicos na cidade de Rio Branco, AC, teve o intuito de compreender o significado cultural da relação entre produtores e consumidores praticados em sistemas de feiras livres, uma vez que essa relação social pode exprimir um conjunto de valores humanos tais como: respeito ao meio ambiente, adesão aos princípios ligados à saúde, solidariedade entre grupos sociais do campo e da cidade, entre outros. Os consumidores foram indagados sobre os tipos de alimentos consumidos, frequência, razões da transição do consumo de produtos convencionais para a produção orgânica (verificando se a compra é esporádica ou se tornou um hábito cotidiano), as ocasiões em que os alimentos são consumidos, o valor simbólico dos alimentos e possíveis mudanças sociais decorrentes da adesão ao sistema. O objetivo foi verificar em que medida o comportamento dos consumidores expressa valores culturais que podem ser associados a uma cultura ecológica contemporânea (Abreu; Siviero, 2015).

A transição da agricultura em direção à sustentabilidade precisa ser acompanhada por mudanças no mercado, fortalecendo a pluralidade de tipos de comércio e de consumidores. Na região Amazônica, existem poucas pesquisas sobre os hábitos de consumidores em relação aos produtos agrícolas. O senso comum é de que o preço do produto é o principal norteador do mercado consumidor. Os consumidores desconhecem os custos de produção e da agregação de valor dos produtos orgânicos – um ponto muito importante, uma vez que esses produtos das unidades familiares orgânicas, em sua ampla maioria, são produzidos a custos maiores que os produtos convencionais, conforme mencionado anteriormente.

Os incentivos governamentais locais, para o transporte da produção e concessão do ponto de venda privilegiado, são fatores importantes para o sucesso e perenidade da Feira Orgânica de Produtos Naturais de Rio Branco (FOPNRB), que já possui dez anos de existência. O incentivo do poder público no apoio à cadeia produtiva de alimentos agroecológicos no Acre é importante no sentido de garantir à população acesso a alimentos mais saudáveis e produzidos com o mínimo de agressão ao ambiente, reduzindo os recursos do Estado com saúde da população, pela maior oferta de produtos locais e promoção da segurança alimentar.

Este estudo indicou diversas fragilidades das ações públicas para o arranjo produtivo local de produtos orgânicos, evidenciados por diversos fatores: insegurança jurídica dos agricultores quanto ao espaço físico de realização da feira, comportando apenas 20 barracas; ausência de assistência técnica especializada no campo e nos processos de comercialização; descontinuidade das ações de capacitação; e morosidade do Mapa em iniciar processo de certificação da produção orgânica do Acre.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A respeito da dimensão social e econômica do desenvolvimento sustentável da agricultura familiar, existiu, na Embrapa Meio Ambiente, um esforço considerável para compreender, qualificar e analisar a problemática ampla em torno da relação social com os recursos naturais, sendo o trabalho desenvolvido por um número reduzido de pesquisadores especialistas em economia e sociologia rural. Contudo, buscou-se esmiuçar os condicionantes internos do ambiente microssocial e possíveis influências do contexto externo institucionais que impactam o funcionamento das relações humanas com o meio ambiente.

No âmbito dos processos de transição da agricultura familiar de regiões próximas de grandes metrópoles, as conclusões mostram que a agricultura orgânica tem um potencial transformador, embora o condutor desta transformação seja inextricavelmente ligado aos atores da cadeia alimentar agroindustrial. A transição para os sistemas orgânicos induziu um número de mudanças fundamentais na gestão das práticas dos agricultores e as provas apresentadas pelas pesquisas sugerem que as práticas agrícolas não cumprem totalmente as exigências em termos da aplicação dos princípios preconizados pela agroecologia e pela agricultura orgânica, com forte influência das forças da convencionalização nas práticas dos agricultores. Os sistemas agrícolas, em geral, não sofreram, portanto, grandes alterações nos seus padrões de cultivo, enquanto existe uma forte dependência geral da substituição de insumos para a gestão das pragas e da fertilidade do solo. A realização dos ideais agroecológicos, com base em redesenho do sistema para criar padrões de cultivo biodiversificados e melhorar a gestão de pragas e o ciclo de nutrientes é talvez um objetivo final para os agricultores orgânicos no longo processo de transição. No entanto, a curto prazo, encontram-se mergulhados numa substancial convencionalização, associada especificamente aos produtos da cadeia de alto valor global de produtos orgânicos certificados. As experiências científicas internacionais realizadas em cinco áreas dos estudos de casos operam todas em áreas que têm poucas explorações orgânicas e, portanto, não há muito apoio de redes e instituições regionais.

Contudo, há também produtores familiares em regiões periurbanas mais diretamente associados às redes sociotécnicas das grandes metrópoles que expressam um modo de produção mais próximo dos ideais definidos pela agroecologia, mas sem predominância de modelo entre os casos estudados.

Os mecanismos que levaram à conversão de tais unidades de produção para o sistema orgânico são principalmente econômicos. Em tais condições, as unidades de produção tornam-se orgânicas produzindo um certo bem de alto valor, com priorização do ganho meramente econômico de um certo grupo do agronegócio do setor orgânico. No entanto, na escala agrícola, este processo atrai os agricultores para se

converterem a práticas orgânicas, e talvez seja por isso que as práticas agrícolas não correspondem plenamente às práticas agroecológicas e princípios orgânicos. A gestão agrícola dentro destes contextos em que há pouco apoio institucional para a transição requer um certo pragmatismo a fim de encontrar um equilíbrio entre os princípios/práticas e os ganhos econômicos.

As pesquisas indicam a necessidade imperiosa de intensificar os estudos de casos para formular ou subsidiar a elaboração de planos de intervenção governamental para que os tomadores de decisões levem em consideração a situação real dos produtores familiares.

Além disto, numa perspectiva mais ampla, a diversidade de situações sociais decorrentes do quadro ambiental e econômico dos municípios estudados leva-nos a visualizar uma situação de crise ambiental nos distintos territórios, a qual não se restringe às atividades humanas pertinentes à agricultura, mas ultrapassa os limites setoriais e ganha a dimensão do território. Trata-se de um verdadeiro drama humano permeado por clamores ecológicos e pela complexidade das situações traduzidas em relações sociais conflituosas, e por lutas em busca de alternativas econômicas incertas, apesar da falta de sensibilidade do Estado quanto ao risco humano.

A retrospectiva realizada indica que os problemas ambientais relacionados à produção de alimentos saudáveis e à preservação de recursos naturais, do solo agrícola, e da biodiversidade das florestas são problemas que possibilitam a eclosão social de uma representação de risco ambiental pelos atores sociais, de evidente importância em uma sociedade moderna civilizada, pois, para além dos riscos ecológicos, cristalizam-se no cenário local situações de risco humano relativo à vida dos indivíduos que dependem da agricultura (e que são obrigados a fazer milagres com manejos ecológicos de solo em porções de terra diminutas), e de risco humano vivenciado por indivíduos que se lançam em direção à sobrevivência em atividades ilegais de extrativismo, historicamente incentivadas. Assim, esse campo do conhecimento, que se orienta para compreender a diversidade social e econômica da produção familiar, gera conhecimento crucial para aqueles que estudam o desenvolvimento agrário brasileiro e alerta sobre a importância e o desafio de pensar e formular políticas, levando em conta os aspectos sociais e os riscos ecológicos. Dessa forma, pode-se avançar em direção às inovações construindo sistemas alimentares sustentáveis.

A agricultura familiar orgânica e a agroecologia são frutos de uma construção social em que as dimensões social, cultural e econômica desempenham papel crucial na aplicação de princípios da agricultura orgânica; buscamos, sem esgotar o assunto, identificar as motivações, interesses sociais, condições, oportunidades e obstáculos em questão, aspectos captados através da aplicação mais ou menos importante destes princípios e o significado e tipo da inserção no mercado.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, L. S. de. **A construção social da relação com o meio ambiente entre agricultores da Mata Atlântica brasileira**. Campinas: Embrapa Meio Ambiente, 2005. 174 p.
- ABREU, L. S. de. Desenvolvimento de metodologias de interação das ciências sociais e agroambientais. In: MEDEIROS, C. A. B.; CARVALHO, F. L. C.; STRASSBURGER, A. S. (ed.). **Transição agroecológica: construção participativa do conhecimento para a sustentabilidade**. Pelotas, RS: Embrapa, 2011. p. 93-94.
- ABREU, L. S. de. **Impactos sociais e ambientais na agricultura: uma abordagem histórica de um estudo de caso**. 2. ed. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI, 1994. 149 p.
- ABREU, L. S. de. Impactos sociais: o emprego na agricultura irrigada de Guaira (SP). **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 12, n. 1/3, p. 68-82, 1995.
- ABREU, L. S. de. Uma análise crítica sobre a definição e classificação do público do PRONAF. In: CAMPANHOLA, C.; SILVA, J. G. da. (ed.). **O novo rural brasileiro: políticas públicas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. v. 4, p. 151-175.
- ABREU, L. S. de; BELLON, S. The dynamics and recomposition of agroecology in Latin America. In: HALBERG, N.; MULLER, A. (org.). **The dynamics and recomposition of agroecology in Latin America**. London: Routledge, 2013. p. 223-245.
- ABREU, L. S. de; BELLON, S. Perspectivas sociológicas em agroecologia no âmbito de um projeto de intercâmbio entre o Brasil e a França. In: URCHEL, M. A.; CANUTO, J. C. (ed.). **Trajatória das ações em agroecologia na Embrapa Meio Ambiente**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. Cap. 6. p. 116-136.
- ABREU, L. S. de; BELLON, S.; BRANDENBURG, A.; OLLIVIER, G.; LAMINE, C.; DAROLT, M. R.; AVENTURIER, P. Relações entre agricultura orgânica e agroecologia: desafios atuais em torno dos princípios da agroecologia. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 26, p. 143-160, 2012.
- ABREU, L. S. de; BILLAUD, J. P.; LAMARCHE, H. Interação entre impactos sociais e ambientais em região de agricultura familiar irrigada. In: VALARINI, P.; LUIZ, A. J. B. (org.). **Impacto ambiental da agricultura irrigada em Guaira - SP**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. p. 51-78.
- ABREU, L. S. de; KLEDAL, P.; PETTAN, K.; RABELLO, F.; MENDES, S. C. Trajetória e situação atual da agricultura de base ecológica no Brasil e no Estado de São Paulo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 26, p. 149-178, 2009.
- ABREU, L. S. de; LAMINE, C.; BELLON, S.; BRANDENBURG, A.; ALENCAR, M. C. F.; BILLAUD, J. P. Trajetória e dinâmica comparada da agroecologia no Brasil e na França. In: ULHÔA, J. L. R. (org.). **Biodiversidade, meio ambiente e desenvolvimento sustentável**. Piracanjuba: Conhecimento Livre, 2020. v. 4, p. 584-611.
- ABREU, L. S. de; LAMINE, C.; BELLON, S.; BRANDENBURG, A.; BILLAUD, J. P. A agroecologia e agricultura familiar no Brasil e na França: história e dinâmica comparada. In: SIMPÓSIO DE AGROECOLOGIA E DESENVOLVIMENTO RURAL, 3., 2014, Araras. Interdisciplinaridade e formação: anais... Araras: Universidade Federal de São Carlos, 2014. Trab7. 24 p. 1 CD ROM.

ABREU, L. S. de; SIVIERO, A. Reflexões em torno do consumo e de consumidores de produtos orgânicos no Baixo Acre. In: SANTOS, R. C. dos; SIVIERO, A. (Org.). *Agroecologia no Acre*. Rio Branco: Ifac, 2015. p. 121-132.

ABREU, L. S. de; WATANABE, M. A. Agricultores familiares do Sul da Amazônia: desafios e estratégias para inovação agroecológica de sistemas de produção. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 11, p. 114-122, 2016.

ABREU, L. S.; WATANABE, M. Rede multiconectada envolvendo as mulheres agricultoras do sul da Amazônia para a soberania alimentar. In: ARZABE, C.; COSTA, V. C. (org.). *Igualdade de gênero: contribuições da Embrapa*. Brasília, DF: Embrapa, 2018. v. 1, p. 50-57.

ALMEIDA, G. F.; ABREU, L. S. de. Estratégias produtivas e aplicação de princípios da agroecologia: o caso dos agricultores familiares de base ecológica da cooperativa dos agropecuaristas solidários de Itápolis - COAGROSOL. *Revista de Economia Agrícola*, v. 56, n. 1, p. 37-53, 2009.

BELLON, S.; ABREU, L. S. Formes d'organisation socio-économique des maraîchers organiques en région péri-urbaine (Ibiúna, SP). *Cahiers Agricultures*, v. 14, n. 1, p. 144-148, jan./fev. 2005.

BILLAUD, J. P.; ABREU, L. S. de. A experiência social de risco ecológico como fundamento da relação social com o meio ambiente. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 16, n. 1, p. 43-66, 1999.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Cadastro nacional de produtores orgânicos. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/organicos/cadastro-nacional-produtores-organicos>. Acesso em: 03 abr. 2022.

DAROLT, M. R.; LAMINE, C.; BRANDENBURG, A.; ALENCAR, M. de C. F.; ABREU, L. S. de. Redes alimentares e novas relações produção-consumo na França e no Brasil. *Ambiente & Sociedade*, v. 19, n. 2, p. 1-22, 2016.

DEVERRE C.; LAMINE C. Les systèmes agroalimentaires alternatifs: Une revue de travaux anglophones en sciences sociales. *Economie Rurale* 3, n. 317, pp. 57-73, 2010.

GOMES, T. C.; ABREU, L. S. de. Percepções de agricultores familiares e técnicos da Região do Vale do Ribeira (SP) sobre o mercado institucional. *Extensão Rural*, v. 26, n. 4, p. 51-68, 2019.

CAMARGO, R. A. L. de; RAMOS FILHO, L. O.; CAMPOS, M. O. de; GONÇALVES, D. Implantação e acompanhamento de sistemas agroflorestais no assentamento Sepé Tiaraju/SP. *Revista Elo: diálogos em extensão*, v. 7, n. 2, p. 28-34, 2018.

KERBER, M.; ABREU, L. S. de. Trajetórias de transição dos produtores de base ecológica de Ibiúna/SP e indicadores sociais de sustentabilidade. *Sociedade e Desenvolvimento Rural*, v. 4, p. 1-31, 2010.

KNUDSEN, M. T.; ALMEIDA, F. G.; ABREU, L. S. de; HALBERG, N. Environmental assessment of organic juice imported to Denmark: a case study on oranges (*Citrus sinensis*) from Brazil. *Organic Agriculture*, v. 1, n. 3, p. 167-185, 2011.

NOBRE, H. G.; SOUZA, T. de J. M.; LE MOAL, M.; CARRILLI, A. L.; RAMOS FILHO, L. O.; CANUTO, J. C. A experiência dos agricultores agroflorestais do assentamento Sepé Tiaraju. *Revista Agriculturas*, v. 8, n. 2, p. 18-23, 2011.

OELOFSE, M.; HOGH-JENSEN, H.; ABREU, L. S. de. Certified organic agriculture in China and Brazil: market accessibility and outcomes following adoption. *Ecological Economics*, v. 69, n. 9, p. 1785-1793, 2010.

OELOFSE, M.; HOGH-JENSEN, H.; ABREU, L. S. de; ALMEIDA, G. F.; EL-ARABY, A.; HUI, Q. Y.; SULTAN, T.; NEERGAARD, A, de. Organic farm conventionalisation and farmer practices in China, Brazil and Egypt. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 243, n. 4, p. 543-560, 2011.

PAYES, M. A. M.; SILVEIRA, M. A. da. **A racionalidade econômica do empresário familiar**. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1997. 19 p. (Embrapa-CNPMA. Documentos, 10).

QUIRINO, T. R.; ABREU, L. S. de. **Problemas agroambientais e perspectivas sociológicas: uma abordagem exploratória**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 74 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 16).

RAMOS FILHO, L. O. **Agricultura, meio ambiente e inclusão social: questões para debate**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 127 p.

RAMOS FILHO, L. O.; ALY JUNIOR, O. (ed.). **Questão agrária no Brasil: perspectiva histórica e configuração atual**. São Paulo: Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária, 2005. 128 p.

SARAVALLE, C. Y.; ABREU, L. S. de. Rede sociotécnica do núcleo de agroecologia Apetê Caapuã de Sorocaba (SP): percepções e avaliação das ações desenvolvidas no contexto das políticas públicas. **Retratos de Assentamentos**, v. 20, p. 57, 2017.

SILVEIRA, M. A. da; MARQUES, P. E. M. Desenvolvimento territorial e multifuncionalidade da cafeicultura familiar no sul de Minas Gerais. In: CAZELLA, A. A.; BONNAL, P.; MALUF, R. S. (ed.). **Agricultura familiar: multifuncionalidade e desenvolvimento territorial no Brasil**. Rio de Janeiro: Mauad X, 2009. p. 229-250.

SPOSITO, E. C.; ABREU, L. S. de. Diversidade da produção familiar e da comercialização de produtos orgânicos de Vitória (ES). *Redes*, v. 22, p. 292-315, 2017.

WATANABE, M. A.; ABREU, L. S. de. **Estudo agroecológico de agricultoras familiares de base ecológica no Sudoeste da Amazônia (Ouro Preto do Oeste, Rondônia)**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2010. 58 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 81).

PARTE II

# AVALIAÇÃO DE IMPACTOS E GESTÃO AMBIENTAL DA AGRICULTURA

*"A melhor maneira de  
prever o futuro é criá-lo"*  
Peter Drucker



# AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

*Marília Ieda da Silveira Folegatti, Anna Leticia Montenegro Turtelli Pighinelli, Fernando Henrique Cardoso, Marcelo Augusto Boechat Morandi, Natalia Crespo Mendes, Nilza Patrícia Ramos, Renan Milagres Lage Novaes, Robson Rolland Monticelli Barizon e Vinícius Gonçalves Maciel*

## INTRODUÇÃO

Os estudos em Avaliação de Ciclo de Vida da Embrapa Meio Ambiente se iniciaram no ano de 2009, com o projeto Avaliação do impacto ambiental potencial do pinhão manso, matéria-prima para a produção de biodiesel, para as condições brasileiras, usando a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida. A vocação da equipe para pesquisas no setor agroenergético se confirmou em um grande projeto intitulado “Avaliação do Ciclo de Vida da cana-de-açúcar e seus derivados produzidos no Centro-Sul brasileiro, baseada em dados, fatores e modelos adaptados às condições nacionais”, conduzido de 2013 a 2017. Nesse mesmo ano, iniciou-se a intensa participação dessa Unidade da Embrapa na construção de políticas públicas para o setor, em especial a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), além da contribuição na elaboração e atualização de protocolos internacionais dedicados a orientar a contabilidade ambiental da geração e uso de produtos agroenergéticos.

Duas principais linhas de pesquisa se estabeleceram: Contabilidade Ambiental de Produtos Agrícolas e Agroindustriais, com foco em Pegada de Carbono, e Mudança de Uso da Terra. As seções seguintes apresentam essa trajetória.

## O QUE É AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA – CONCEITOS, NORMAS ISO 14040 E 14044

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta de gestão ambiental que permite avaliar o desempenho ambiental de produtos e serviços. Com uma abordagem sistêmica, a ACV do berço ao túmulo traz a quantificação de potenciais impactos ambientais considerando todo o ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas, produção, distribuição, uso, até a disposição final de um produto. Assim, além da identificação dos estágios do ciclo de vida que mais contribuem para a geração

de impactos, os resultados da ACV permitem identificar e implementar melhorias e integrar aspectos ambientais aos projetos e desenvolvimento de produtos, além de fornecer subsídios para as declarações ambientais de produto (DAP).

Trata-se de uma ferramenta com forte base científica e metodologia reconhecida internacionalmente. Padronizada pelas normas ISO 14040:2006 e 14044:2006 (International Organization for Standardization, 2006a, 2006b), a ACV possui uma estrutura iterativa composta por quatro fases principais:

1. Definição de objetivos e escopo, em que, além de aplicação e público-alvo, são definidos detalhes como o sistema de produto, unidade funcional, fluxos de referência, fronteiras do estudo, procedimentos de alocação, métodos e tipos de impactos a serem abordados, requisitos de qualidade de dados, entre outros.
2. Análise de inventário do ciclo de vida (ICV), que envolve a coleta de dados e os cálculos necessários para a construção de um inventário de entradas (materiais, energia e recursos naturais) e saídas (produtos, emissões e resíduos para tratamento) associadas ao sistema de estudo avaliado.
3. Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV), fase na qual os resultados do ICV são convertidos em potenciais impactos ambientais por meio de modelos e indicadores de impacto. Esses modelos e indicadores compõem os métodos de AICV, os quais são selecionados durante a definição do escopo e, de maneira geral, abordam categorias de impacto como: mudanças climáticas, material particulado, recursos bióticos e abióticos, consumo de água, acidificação terrestre, eutrofização (de água doce e marinha), ecotoxicidade (de água doce, marinha e terrestre), toxicidade humana, radiação ionizante, formação de ozônio fotoquímico, depleção da camada de ozônio e uso da terra.
4. Interpretação, etapa em que todos os resultados são compilados a fim de se identificar limitações do estudo, pontos críticos e oportunidades de melhoria, bem como fornecer recomendações.

Estudos de ACV são realizados para diferentes escopos e aplicações, tanto pelo setor acadêmico como pelo industrial e governamental. Diante da relevância e complexidade dos processos agrícolas, as seções seguintes apresentam os desafios e contribuições metodológicas produzidas pela Embrapa Meio Ambiente.

As contribuições contemplam modelos de emissões, procedimentos de alocação, ferramentas para a construção de inventários e bancos de dados tropicalizados, desenvolvidos para suprir necessidades relacionadas, principalmente, à fase de análise do inventário do ciclo de vida, que influencia, conseqüentemente, as demais fases da ACV.

## ACV NO AMBIENTE AGRÍCOLA: DESAFIOS, TROPICALIZAÇÃO DE MODELOS AMBIENTAIS E BANCOS DE DADOS

A avaliação de ciclo de vida surgiu como consequência da crise energética da década de 1970 e da publicação do documento “Os Limites para o Crescimento” – um relatório sobre o crescimento exponencial da economia e da população contra uma oferta finita de recursos. Um dos resultados desse movimento foi a demanda por um sistema detalhado para análise da energia requerida para a manufatura de produtos. A ACV ampliou essa análise para incluir não apenas a depleção de recursos energéticos, mas a de outros recursos naturais (materiais), e para incluir os impactos da geração de emissões e resíduos (United Nations Environmental Programme, 1996).

A ACV foi proposta originalmente para processos industriais. Essa técnica implica na contabilização de fluxos de material e energia trocados entre o ambiente onde ocorrem os processos produtivos e o meio ambiente, e pressupõe o fechamento de balanços de massa. Em uma estrutura fisicamente limitada (como a industrial), é possível controlar esses fluxos. Emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos são necessariamente tratados e relatados por força de legislações ambientais.

Já os processos agrícolas (aqui entendidos no sentido amplo, incluindo os processos florestais e pecuários) ocorrem em ambiente aberto. Não há fronteiras físicas entre o ambiente de produção e o ambiente natural. Logo, muitos fluxos de saída não são quantificáveis. Por outro lado, os recursos naturais afetam diretamente e são diretamente afetados pela atividade produtiva. As “condições de produção” são variáveis, especialmente por efeito de fatores climáticos (temperatura e precipitação pluviométrica) e de suas consequências (por exemplo, produtividade, incidência de doenças, dentre outras).

Isso gera uma enorme complexidade. Em estudos de ACV de produtos agrícolas, as saídas dos processos (emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos) são estimadas por modelos, muitos deles dependentes de parâmetros específicos de clima, solo e características de plantas. Também aspectos relativos ao manejo nutricional e fitossanitário precisam ser considerados.

Modelos para estimação de fluxos de saída dos sistemas produtivos para os compartimentos ambientais são apresentados em “guias metodológicas” para estudos de ACV, em geral associadas a bancos de dados de ICV. Podem ser mencionadas as guias: Nemecek; Kägi (2007), Nemecek; Schnetzer (2012), Nemecek et al. (2015), Calvo Buendía et al. (2019), Van Paassen et al. (2019), Koch; Salou (2020).

Essas guias metodológicas reúnem modelos desenvolvidos originalmente para a agricultura de clima temperado, que merecem adequação ou parametrização para melhor representarem a agricultura de clima tropical e subtropical. O primeiro esfor-

ço da Embrapa Meio Ambiente nesse sentido se expressou na guia “Life Cycle Inventories of Agriculture, Forestry and Animal Husbandry: Brazil” (Folegatti-Matsuura; Picoli, 2018), resultado de uma parceria entre Embrapa e ecoinvent Centre. Atualmente, a ICVCalc-Embrapa, ferramenta eletrônica desenvolvida pela Embrapa Meio Ambiente para a elaboração de inventários de processos agrícolas, também traz um módulo com modelos selecionados e parametrizados para o Brasil – a BR-Calc (que será abordada com mais detalhes no tópico **Bancos de dados de inventários de ciclo de vida tropicalizados**).

## ENTREGAS DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA: PERFIL AMBIENTAL, ROTULAGEM AMBIENTAL, PEGADA DE CARBONO

Embora um estudo de ACV possa se restringir à análise de inventário de ciclo de vida (ISO, 2006a) – o que permite concluir sobre a quantidade de recursos naturais consumidos e de emissões de potenciais poluentes geradas por um produto –, seu resultado mais elaborado é o perfil ambiental do produto, originário da avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV).

Na AICV, os fluxos de material quantificados no ciclo de vida de um produto são associados a categorias de impactos ambientais selecionadas, por pertinência (etapa de classificação), e são processados cálculos que aplicam os indicadores de categoria de impacto (etapa de caracterização), assim gerando o perfil ambiental (International Organization for Standardization, 2006a). Cada método de AICV contempla um conjunto específico de categorias de impactos ambientais e de modelos ambientais.

Embora a seleção das categorias de impactos ambientais corresponda a uma atividade da definição do escopo de um estudo de ACV, a experiência acumulada tem indicado conjuntos de categorias de impactos mais pertinentes à natureza dos processos agrícolas.

Isso é refletido em uma importante iniciativa da Comissão Europeia, que busca garantir um padrão metodológico para estudos de ACV: a “pegada ambiental de produto”, do inglês *product environmental footprint* (PEF). A PEF reúne os produtos em categorias, para as quais propõe regras, as *product environmental footprint categories rules* (PEFCR), que incluem a indicação de categorias de impactos mais relevantes.

Por exemplo, as regras PEFCR sobre produtos para alimentação animal (*feed for food-producing animals*), que inclui soja (milho e outros grãos), determinam como categorias de impacto mais relevantes: mudanças climáticas, material particulado, acidificação terrestre e de água doce, uso da terra, eutrofização terrestre e escassez de água

(European Commission, 2020). Esse conjunto de categorias de impactos ambientais compõe o perfil ambiental do produto soja.

O perfil ambiental de um produto pode orientar melhorias de processo, com consequente redução de impactos ambientais. Esse tipo de estudo também pode embasar declarações ambientais de produto. Declarações ambientais representam uma forma de comunicar o desempenho ambiental de um produto e têm efeito em relações comerciais.

Muito embora a ACV tenha o diferencial de ser uma ferramenta de avaliação de impactos ambientais holística e sistêmica (FAO, 2022b), tem sido comum sua aplicação como método dedicado a um problema único (“single issue”). O principal exemplo desse emprego da ACV é a pegada de carbono de produtos, que considera apenas a categoria de impacto de mudanças climáticas.

A pegada de carbono de produtos é normatizada pela ISO 14067:2018 (International Organization for Standardization, 2018) e traduzida em muitos protocolos de certificação privados. Também é muito adotada em políticas ambientais, em particular nas políticas para biocombustíveis, como a Renewable Energy Directive (RED), o Renewable Fuel Standard Program (RFS), o Low Carbon Fuel Standard (CARB), e também a Política Nacional para Biocombustíveis (RenovaBio), de cuja construção a Embrapa Meio Ambiente participou ativamente.

## AVANÇOS CONQUISTADOS PELA EMBRAPA

### Mudança de Uso da Terra em Avaliação de Ciclo de Vida

A mudança de uso da terra (MUT), ou land use change (LUC), em inglês, é um dos processos com maior potencial de impacto nos resultados da ACV de produtos agropecuários. Na categoria de impacto de mudanças climáticas, a MUT pode levar a emissões de gases de efeito estufa (GEE) de 8 a 20 vezes maiores que as emissões de todos os demais processos envolvidos na produção agropecuária (Castanheira; Freire, 2013; Van Middelaar et al., 2013; Poore; Nemecek, 2018). O processo ainda é bastante relevante para outras categorias, como biodiversidade e serviços ecossistêmicos (DeFries et al., 2004; GavriloVA, 2019). No Brasil, a MUT tem sido responsável por uma parcela considerável das emissões de GEE nacionais, contribuindo para 46% das emissões totais do país em 2020 (SEEG, 2021). Portanto, estimativas acuradas de MUT são críticas para os estudos de ACV de produtos brasileiros e consequentemente para as ações de descarbonização das cadeias de produção.

A mudança de uso da terra pode ser do tipo direta ou indireta (International Organization for Standardization, 2018). A mudança direta (dMUT) ocorre quando há

uma mudança no uso da terra dentro das fronteiras do sistema e a indireta (iMUT), quando há uma mudança fora das fronteiras do sistema, causada por uma mudança direta (International Organization for Standardization, 2018). Por exemplo, quando o objeto de estudo é o cultivo X e o sistema em análise é a fazenda usada para produção desse cultivo, a mudança de uso da terra de pastagem para o cultivo X dentro da fazenda é uma dMUT. Já a mudança de floresta para pastagem na fazenda vizinha pode ser considerada uma iMUT. Em ambos os casos, as mudanças podem levar a emissões ou sequestros de GEE em altos níveis.

A contabilização das emissões de GEE derivadas de dMUT é frequentemente exigida nos protocolos e padrões de ACV internacionais (por exemplo, em ILCD, 2010; Nemecek et al., 2019; dentre outros). No entanto, o levantamento de dados primários para essa tarefa pode ser inviável ou trabalhoso, seja pela falta de dados de alta resolução, seja pelos altos custos e tempo que podem estar associados a essa tarefa (Brenton et al., 2010). Para contornar essa limitação, métodos e ferramentas foram desenvolvidos em nível internacional para disponibilizar estimativas de dMUT para uso em estudos de ACV (por exemplo, em Blonk Consultants, 2021; Lam et al., 2021). No entanto, as estimativas de dMUT eram frequentemente disponibilizadas apenas em nível nacional (por exemplo, em Tubiello et al., 2021) ou apenas para cultivos em recortes regionais e temporais específicos (por exemplo, em Figueirêdo et al., 2013; Maciel et al., 2015) ou continham representações inconsistentes do território brasileiro (por exemplo, em Novaes et al., 2022).

Nesse contexto, a Embrapa Meio Ambiente tem coordenado ações e projetos de pesquisa e desenvolvimento de métodos e estudos que permitam a estimativa mais acurada da mudança de uso da terra para subsidiar estudos de ACV e de pegada de carbono de produtos agropecuários brasileiros. As principais linhas de atuação têm sido: 1) desenvolvimento e aperfeiçoamento do método Brazilian land use change (BRLUC) para estimativas de dMUT para os produtos brasileiros; 2) geração de dados e informações para apoio à consideração de MUT em políticas públicas envolvendo a contabilidade de carbono.

O método BRLUC foi desenvolvido para permitir a estimativa de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) associadas a uma ampla gama de produtos agropecuários brasileiros, em nível subnacional e compatível com os principais protocolos internacionais. Em sua primeira versão, ele permitia a estimativa de emissões em nível estadual para 64 cultivos, além de pastagem e silvicultura (Novaes et al., 2017). Uma nova versão foi recentemente publicada (Garofalo et al, 2022) e tem os resultados em nível municipal, com base em dados espacialmente explícitos. Ambas as versões estão disponíveis gratuitamente para acesso e download no portal da Embrapa.

Devido a sua consistência e abrangência, os resultados do método foram incorporados ao banco de dados de ACV Ecoinvent (<https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database>),

um dos principais em nível internacional (Donke et al., 2020). Seus dados também foram incorporados no banco de dados internacional GFLI e no Banco Nacional de Inventários de Ciclo de Vida SICV-Brasil, gerido pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT/MCTI<sup>1</sup>). A incorporação a esses bancos de dados leva automaticamente à adoção do método e de seus resultados pelos seus muitos e variados usuários, que vão desde multinacionais de consultoria e da agroindústria a grandes centros de pesquisa e governos. Essa adoção permite que os estudos que analisem produtos agropecuários brasileiros obtenham resultados mais refinados e acurados sobre o sistema de produção nacional.

Alguns desses estudos têm sido publicados e fornecem uma amostra da amplitude de aplicações do método. São exemplos os estudos sobre: o impacto de rações para peixes (Silva et al., 2018); a pegada de carbono da produção de manga e de sisal no semiárido (Müller-Carneiro et al., 2019; Folegatti-Matsuura et al., 2019), da carne bovina brasileira (Dinato et al., 2019), de coco no nordeste brasileiro (Sampaio et al., 2021) e da soja produzida no Pará (Brito et al., 2021); o desempenho da manufatura de jeans no Brasil (Morita et al., 2020); e efeitos da modelagem sobre a pegada de carbono de biocombustíveis (Brandão et al., 2021). Essa amostra exemplifica a ampla versatilidade do método e sua adoção para os mais diversos fins.

Com base na experiência adquirida nessas ações de pesquisa e desenvolvimento, a Embrapa Meio Ambiente tem também contribuído para o apoio à consideração de MUT em políticas públicas que envolvam a contabilidade de carbono. O principal destaque tem sido a atuação junto ao RenovaBio, da qual resultou a proposta para a definição dos critérios de elegibilidade no programa (Moreira et al., 2018). A equipe também tem contribuído com notas técnicas e informações para políticas internacionais, como para a definição de critérios e parâmetros para avaliação de sustentabilidade no ciclo de vida de biocombustíveis para uso na aviação no Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) – esquema de redução e compensação de carbono para a aviação internacional – junto à Organização Internacional de Aviação Civil, e para uso marítimo, no International Maritime Organization - Organização Marítima Internacional; e para proposta de fontes de energia renovável na Renewable Energy Directive (RED) – diretiva de energias renováveis – junto à Comissão Europeia. A equipe também atuou recentemente junto à Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) para o ajuste de dados da área agropecuária do Brasil (Novaes et al., 2022), com grande impacto em modelos de MUT globais.

---

<sup>1</sup> Disponível em: <https://sicv.acv.ibict.br>

## Pesticidas em Avaliação de Ciclo de Vida - PestLCI

O Brasil é um dos maiores consumidores de pesticidas do mundo (FAO, 2022a). O impacto do uso dessas substâncias é motivo de grande preocupação, em razão dos riscos à saúde humana e ao meio ambiente (Tang et al., 2021). O uso excessivo dos pesticidas combinado com práticas agrícolas inadequadas pode resultar em contaminação de compartimentos ambientais, como águas superficiais e subterrâneas, biota aquática, polinizadores e mamíferos terrestres (Mahmood et al., 2016; Uhl; Brühl, 2019; Markert et al., 2020). Para uso seguro dos pesticidas no ambiente agrícola, devem ser seguidas as recomendações previamente estabelecidas em seu rótulo e bula, mediante recomendação técnica de profissional qualificado, de forma a minimizar possíveis impactos.

Nesse sentido, o conhecimento da dinâmica ambiental dessas substâncias e seus potenciais impactos é de suma importância. Essa dinâmica é bastante complexa e envolve inúmeros fatores como as propriedades físico-químicas das moléculas, características edafoclimáticas, além de práticas agrícolas, como o método de aplicação dos pesticidas e de preparo do solo.

Diante desse cenário complexo e interdependente, um dos principais desafios da ACV aplicada a sistemas agrícolas é estimar as emissões de pesticidas para os diferentes compartimentos ambientais e, com isso, quantificar os seus impactos sobre a saúde humana e o meio ambiente (Fantke et al., 2017). Devido à elevada incerteza dos resultados e dos desafios relacionados à avaliação da toxicidade dos pesticidas, muitos estudos de ACV no setor agroalimentar não realizam uma avaliação dos impactos da toxicidade dessas substâncias ou utilizam abordagens bastante simplistas. Isso resulta em uma avaliação incompleta e traz o risco de subestimar potenciais pontos críticos relacionados ao uso dos pesticidas (Gentil et al., 2020).

Para superar esse desafio de estimar emissões de pesticidas de áreas agrícolas para compartimentos ambientais, o modelo PestLCI foi desenvolvido em 2006 na Dinamarca (Birkved; Hauschild, 2006). A base de dados do modelo foi inicialmente desenvolvida para alguns cenários de solo e clima dinamarqueses; é, portanto, de aplicação limitada. Em 2012, foi lançada uma nova versão do modelo, em que os cenários foram expandidos para o continente europeu (Dijkman et al., 2012). Em 2020, após uma série de modificações, foi lançada a versão PestLCI Consensus, disponibilizada em base web (<https://pestlciweb.man.dtu.dk/>). Um dos principais avanços dessa versão foi a possibilidade de inserir novos cenários na base de dados do modelo (Melero et al., 2020). Nas versões anteriores somente era possível utilizar os cenários previamente disponibilizados pelos desenvolvedores do modelo, o que excluía os países de clima tropical.

Diante da possibilidade de incorporar cenários brasileiros à base de dados do PestLCI Consensus e aprimorar os estudos de ACV dos produtos agrícolas, a

Embrapa Meio Ambiente, em parceria com a Fundação Espaço Eco, coordenou um estudo que visou a parametrização de 35 cenários de produção agrícola brasileiros.

Para tanto, os cenários foram selecionados com base em sua representatividade no agronegócio nacional, sendo consideradas as mesorregiões que, somadas, representam 70% do valor da produção agrícola brasileira. Com base na definição das regiões representativas, foi realizado um levantamento das características de seus solos e climas. Como resultado dessa iniciativa, os cenários parametrizados foram inseridos na base de dados do PestLCI e estão disponíveis para todos os usuários de ACV. Os detalhes da parametrização foram disponibilizados em uma publicação, que também traz orientações para o uso do modelo (Barizon et al., 2021).

Com a disponibilização das informações de solo e clima das principais regiões produtoras do agronegócio brasileiro, a expectativa é que os estudos de ACV de sistemas agroalimentares no Brasil possam estimar os impactos dos pesticidas na saúde humana e no meio ambiente com um nível menor de incertezas e, assim, colaborar com sua sustentabilidade.

## SISTEMAS DE PRODUÇÃO NA AGRICULTURA TROPICAL: ALOCAÇÃO

A extensão de terras do Brasil implica em variação considerável nas condições de clima e solo, o que permite a exploração agrícola nas mais diversas regiões, em um mesmo período do ano (mesma safra), além do uso em períodos diferentes do ano, em uma mesma região (safra, safrinha, segunda safra, terceira safra, entre outros). Essa condição diferenciada exigiu o desenvolvimento, ao longo das últimas décadas, de técnicas agrícolas que envolvem desde o monocultivo até a combinação de culturas em sistemas complexos de plantio, como a sucessão, a rotação, o consórcio e a integração (Hirakuri et al, 2012).

O melhor aproveitamento da área é um benefício diretamente percebido ao se adotar os sistemas complexos, mas há ainda aumento de produção, compartilhamento de práticas agrícolas, com seus respectivos insumos e operações, além de benefícios ambientais e sociais (Wagner et al., 2010). Atribuir corretamente as emissões de um insumo compartilhado entre culturas em um sistema de produção complexo, ou ainda quando uma cultura pode proporcionar mais de um produto com valor econômico, é uma dificuldade frequente e inerente à contabilização da pegada ambiental a partir da perspectiva do ciclo de vida. Para isso, a ACV pode utilizar a abordagem de alocação.

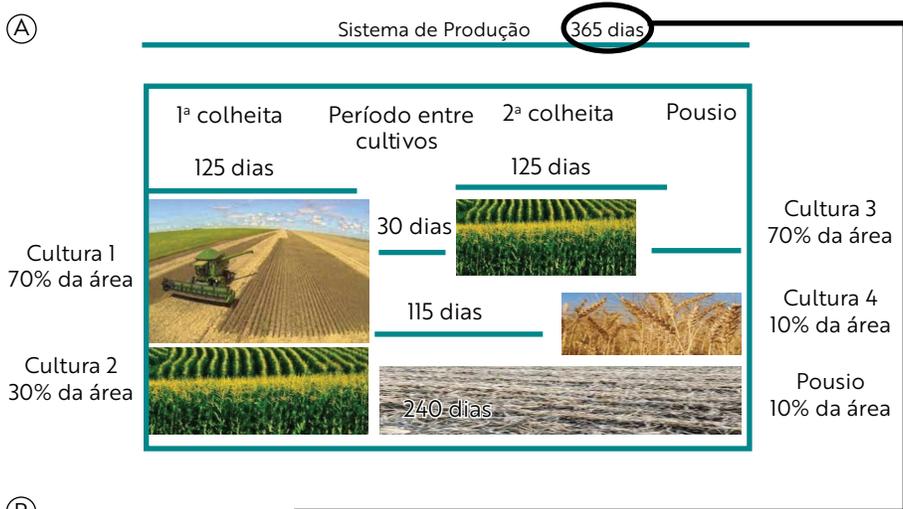
A alocação é definida, segundo a ISO 14040 (International Organization for Standardization, 2006a), como o “particionamento dos fluxos de entrada ou saída de um processo ou sistema de produto, entre o sistema de produto em estudo e um ou mais outros sistemas de produto”. Portanto, a alocação distribui os fatores de impacto en-

tre o produto de referência e os coprodutos, quando são simultâneos e dependentes. Cabe destacar que a recomendação primária da norma é de evitar a alocação, sempre que possível, devido ao alto grau de incerteza da atribuição das cargas. Assim, sugere-se optar pela subdivisão do sistema em subprocessos com dados específicos ou pela expansão do sistema de produto, para incluir a funcionalidade mais ampla dos coprodutos, no objetivo principal do estudo (International Organization for Standardization, 2006a). Nos casos em que a alocação não pode ser evitada, os métodos recomendados são baseados em critérios físicos (relação física subjacente entre entradas/saídas e as emissões geradas) ou econômicos (valor de mercado); destaca-se que a alocação econômica está sujeita às flutuações de preços do mercado, por isso é utilizada somente quando não há outra possibilidade (International Organization for Standardization, 2006a).

Na ACV de produtos agrícolas é comum que a alocação não possa ser evitada e a recomendação é priorizar a adoção da relação física entre os produtos e coprodutos. Nessa abordagem, a fração das cargas ambientais atribuída a um produto é calculada com base em algum atributo físico, como massa, volume, energia, área ocupada ou a combinação de área e tempo de ocupação (área-tempo).

Considerando que grande parte das culturas agrícolas, no Brasil, é produzida em sistemas complexos, a equipe de ACV da Embrapa Meio Ambiente propôs uma estratégia de alocação que considera, simultaneamente, a área e o tempo de ocupação de cada cultura em um ciclo completo de produção.

Na Figura 10.1A é possível observar um exemplo de um ciclo de cultivo de 1 ano agrícola (365 dias), em que há cultivo de verão de soja e milho, seguido de uma safriinha de milho, de uma safra de inverno de trigo e de parte da área em pousio. Assim, considerando-se as respectivas áreas e tempos de ocupação e a realização de uma operação de preparo do solo em área total antes do plantio da safra, todas as emissões relativas a essa operação seriam divididas para os cultivos que se beneficiassem de seu uso, inclusive para o pousio, que posteriormente teria sua fração proporcionalmente dividida entre as culturas de interesse econômico (Figura 10.1B).



(B)

1							
2	Anos do sistema de produção						
3	Data do plantio da primeira cultura do sistema de produção	10/10/2020					
4	Data da colheita da última cultura do sistema de produção	10/10/2021					
5	Total de dias	365					
6	Total de anos	1,00					
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							

Culturas	% Area	dias_entrada	dias_default (Sistema de produção)	Carga para cultura	Tratamento da carga	Fator de Alocação
soja (cultura 1)	70,00%	125	125	0,240	Recebe carga	0,3889
milho (cultura 2)	30,00%	125	125	0,103	Recebe carga	0,1667
milho (cultura 3)	70,00%	125	125	0,240	Recebe carga	0,3889
trigo (cultura 4)	10,00%	125	125	0,034	Recebe carga	0,0556
Pastagem			240	0,000	Selecionar	0,0000
Cultura de cobertura				0,000	Selecionar	0,0000
Pousio	10,00%		240	0,066	Doa cargas	0,0000
Período entre cultivos				0,318		

Figura 10.1. Ilustração de um sistema de rotação de culturas que ocupa um ano agrícola (A) e do cálculo de alocação entre as culturas participantes do sistema, usando a ICVCalc (B).  
Fonte: Nilza Patrícia Ramos.

Nemecek et al. (2001) relatam o uso da distribuição das cargas relativas ao pousio entre culturas do sistema de produção, para estudos de ACV, independentemente de seu interesse econômico. Já nos estudos da Embrapa Meio Ambiente, a estratégia de alocação baseada em área-tempo tem priorizado a distribuição das cargas de pousio

apenas entre as culturas de interesse econômico, o que exclui as culturas de cobertura. Essas últimas favorecem o sistema de produção como um todo, fornecendo biomassa que recobre a superfície do solo em períodos de entressafra, com a finalidade de evitar erosão e crescimento de plantas daninhas (Alcântara et al., 2000; Perin et al., 2004). Essa é uma situação muito comum no Brasil, mas não em outros países, o que justifica a abordagem proposta pela Embrapa. No entanto, a literatura ainda é controversa, com relatos de atribuição ou não de cargas às culturas de cobertura (Costa et al. 2020), pois, apesar dos benefícios citados, a presença de resíduos em campo pode emitir óxido nitroso, que tem alto potencial de aquecimento global (Joint Research Centre, 2011). Cabe destacar que a decisão sobre como alocar cargas ambientais em sistemas de produção depende, obviamente, do objetivo e escopo do estudo de ACV.

O impacto do uso dessa estratégia de alocação nos resultados de ICV e nos estudos de ACV de produtos agrícolas cultivados em sistemas complexos pode ser visualizado na Tabela 10.1. Nota-se que, a depender do insumo, da operação ou do processo que as culturas dividem, o efeito nas emissões pode ser maior ou menor em uma determinada categoria de impacto da ACV. Para o caso do amendoim, Ramos et al. (2016) verificaram que o cultivo em sucessão com pastagem poderia reduzir em 15% o impacto na categoria de mudanças climáticas – isso porque, de um total de dez operações utilizadas no preparo do solo para se cultivar amendoim, oito podem beneficiar também a pastagem que, segundo essa estratégia, passa a compartilhar as emissões das operações com o amendoim.

**Tabela 10.1.** Redução nos impactos para diferentes categorias, em função do uso da alocação em sistemas de rotação, sucessão e integração entre culturas agrícolas.

Sistema	Mudanças climáticas	Acidificação terrestre	Eutrofização terrestre	Eutrofização da água doce	Referência
Rotação soja/girassol em relação ao girassol solteiro	↓43%	↓26%	↓9%	↓7%	Matsuura et al., 2017
Integração etanol/carne bovina em relação aos dois isolados	↓0,5%	↓2%	↓2%	-	Picoli et al., 2020
Sucessão amendoim/pastagem em relação ao amendoim solteiro	↓15%	↓23%	↓2%	↓15%	Ramos et al., 2021

Outro uso da alocação, além do empregado em sistemas de produção, envolve a necessidade de distribuição de cargas entre produtos e coprodutos de um processo de produção. Nesse caso, um exemplo que merece ser mencionado é o da construção da RenovaCalc, ferramenta de cálculo da nota de eficiência energético-ambiental dos biocombustíveis brasileiros que participam da RenovaBio. Nessa ferramenta, a equipe da Embrapa Meio Ambiente e seus parceiros optaram pelo uso da alocação

energética para dividir as emissões de GEE do ciclo de vida dos biocombustíveis entre esses e seus coprodutos (Folegatti-Matsuura et al., 2018). Assim, no caso do etanol de cana-de-açúcar, a intensidade de carbono é dividida com o açúcar e a energia elétrica gerados na usina, após a conversão de todos esses produtos em base energética (MJ). Se a alocação energética não fosse adotada, só restaria a opção da alocação econômica para abarcar a energia elétrica como coproduto – que é extremamente importante para a matriz energética nacional (BEM, 2021). O mesmo princípio é aplicado no caso do biodiesel e do etanol de milho.

Em linhas gerais, mesmo existindo controvérsias e questionamentos a respeito do uso da alocação em estudos de ACV e ainda mais polêmicas sobre a escolha do método a ser utilizado, entende-se que pode ser necessário utilizar esse procedimento para dividir cargas ambientais. Como a escolha do método afeta significativamente resultado da ACV, é fortemente recomendável realizar a análise de incertezas e de sensibilidade para determinar as consequências das escolhas de alocação (ILCD, 2010). Não há consenso na comunidade científica sobre qual alternativa deve prevalecer (Costa et al., 2020).

## **Bancos de dados de inventários de ciclo de vida tropicalizados**

Inventário do Ciclo de Vida (ICV), segundo a ISO 14040:2006 (International Organization for Standardization, 2006a), é a “compilação e quantificação de entradas e saídas através do ciclo de vida de um produto”. As “entradas”, correspondem a materiais ou energia extraídos da natureza. As “saídas” correspondem a emissões (gasosas, líquidas e sólidas) para o meio ambiente, potencialmente poluentes. “Ciclo de vida são estágios consecutivos e interligados de um sistema de produto, desde a aquisição ou geração de matéria-prima a partir de recursos naturais até a sua disposição final” (International Organization for Standardization, 2006a). Em outras palavras, o ICV contabiliza a troca direta de material e energia com o meio ambiente, em todos os processos do ciclo de vida de um produto.

Um ICV é composto por inventários de processo, armazenados em bancos de dados e vinculados entre si com o apoio de programas computacionais de ACV. Os inventários de processo, por sua vez, contabilizam o material e a energia envolvidos em um processo produtivo. O processo é quantitativamente caracterizado pelo inventário, que reflete seu escopo tecnológico, geográfico e temporal.

Para que um estudo de ACV tenha qualidade, os inventários de processo devem bem representar a realidade. Para processos agrícolas em ambiente tropical e subtropical, em um país das dimensões do Brasil, isso representa um grande desafio, devido a alguns fatores:

- a. Natureza da agricultura, onde os recursos naturais afetam diretamente e são diretamente afetados pela atividade produtiva. As características do ambiente

são fatores determinantes da capacidade produtiva e da qualidade dos produtos nele gerados; por outro lado, também definem a vulnerabilidade desse ambiente.

- b. Grande extensão territorial nacional, coberta por seis diferentes biomas, com enorme diversidade de clima, solo e recursos biológicos. Também a geografia humana é diversa, implicando em diferentes níveis de acesso à informação, à tecnologia, a recursos financeiros e a outros recursos. Ainda, a escala de produção é altamente variável.
- c. Dificuldade de definir recortes geográficos representativos (áreas homogêneas, quanto a clima, solo e nível tecnológico) e a eles associar dados qualificados de diferentes naturezas (estatísticos, derivados de sistema de informação geográfica, técnicos agrônômicos, dentre outros).
- d. Inadequação dos modelos para estimação de emissões do ambiente produtivo para os compartimentos ambientais, originalmente desenvolvidos para a agricultura de clima temperado. Idealmente, novos modelos precisam ser propostos para melhor representar os processos biofísicos das regiões agrícolas brasileiras. Merecem adequações os parâmetros: edafoclimáticos, agrônômicos, referentes à composição química da biomassa, dentre outros.
- e. Prática de sistemas de produção mais complexos, possibilitados por características climáticas, sendo viáveis várias safras em um mesmo ano agrícola. Largo emprego do plantio direto, com várias implicações no manejo das culturas.
- f. Especificidade de alguns insumos empregados na agricultura brasileira, como os corretivos de solo (altamente exigidos em solos muito intemperizados), fertilizantes organominerais (cuja composição é dependente da disponibilidade e qualidade da fração orgânica que os compõem), pesticidas (cuja demanda é afetada por condições climáticas), dentre outros.
- g. Fronteira agrícola ainda em expansão, com um grande dinamismo na MUT.

Até meados da década de 2010, havia poucos bancos de dados de inventários de ciclo de vida (BD-ICV) com inventários de processos agrícolas e com inventários brasileiros. O banco de dados Ecoinvent, ainda hoje o principal banco de dados dessa natureza, continha apenas quatro inventários de processos brasileiros (energia elétrica, soja, cana-de-açúcar e madeira de Araucária). Uma iniciativa financiada pela Secretaria de Relações Econômicas do Governo Suíço (Swiss State Secretariat for Economic Affairs) e intervenida pelo ecoinvent Centre, buscou popular esse banco de dados com inventários de processos regionalizados – e o Brasil foi um dos países eleitos.

Nessa oportunidade, ocorreu a maior contribuição brasileira a um banco de dados internacional de ICV. A Embrapa publicou mais de 130 inventários de processos

agrícolas, pecuários e agroindustriais, incluindo algumas das principais commodities brasileiras – soja, milho, cana-de-açúcar, eucalipto e derivados; pecuária bovina de corte; e manga e derivados (como representante da fruticultura tropical de exportação). Também foram publicados mais de 400 conjuntos de dados de MUT, representando a integração do modelo BRLUC, de autoria da Embrapa, àquele banco de dados.

Grande parte desses inventários (54) foi adequada ao padrão de qualidade Quali-Data (Rodrigues et al., 2016) e convertida ao formato eletrônico (ILCD) do SICV-Brasil. Essa foi a maior contribuição recebida por esse banco de dados desde sua operacionalização, em 2015. Naquele momento, inclusive, a Embrapa contribuiu com a oferta do primeiro conjunto de dados do SICV-Brasil. Essa parceria se mantém ativa: em 2021, foram publicados novos inventários de importantes produtos agrícolas de exportação: café (8), amendoim e derivados (9). Cabe destacar que o SICV-Brasil é um banco de dados público, de acesso gratuito e, embora nacional, é um dos provedores da plataforma internacional Global LCA Data Access (GLAD) – a Rede Global de Acesso a Dados de ACV, em português (Nascimento et al., 2020).

Atualmente, a Embrapa também colabora com o banco de dados do Global Feed LCA Institute (GFLI<sup>2</sup>), orientado a conjuntos de dados para a produção animal. Em 2022, foi publicada, no GFLI e no Ecoinvent, uma atualização dos inventários de soja, milho, cana-de-açúcar e derivados.

A elaboração do inventário é a etapa de um estudo de ACV que consome mais tempo e recursos. Sua boa consecução depende do conhecimento profundo do processo produtivo que se quer representar, e também de suas interações com o meio ambiente. Requer uma equipe multidisciplinar que, no caso de produtos agrícolas, domine as áreas de fitotecnia, fitopatologia, nutrição de plantas, além das áreas de modelagem ambiental e ACV.

Povoar BD-ICV significa fazer chegar a diversos públicos (acadêmicos, profissionais da área de sustentabilidade, gestores públicos) informações qualificadas para estudos de ACV dedicados à melhoria de produtos e processos, a subsídios a declarações ambientais, à promoção de compras sustentáveis, ao embasamento a políticas públicas ambientais. Significa promover uma agricultura mais sustentável – o que é prioridade na agenda de empresas e governo.

## Ferramentas para Avaliação de Ciclo de Vida: RenovaCalc, ICVCalc, AgriOp

Além da contribuição dada pela Embrapa Meio Ambiente para a construção ou povoamento de BD-ICV, que são a base para estudos de ACV, essa unidade também

---

<sup>2</sup> Disponível em: <https://globalfeedlca.org/gfli-database/>

tem dedicado esforços ao desenvolvimento de ferramentas computacionais para elaborar inventários de processos agrícolas, para estimar a pegada de carbono de produtos e ferramentas acessórias, apresentadas a seguir.

## RENOVACALC

Como citado anteriormente, a RenovaBio é a Política Nacional de Biocombustíveis, que foi instituída pela Lei 13.576/2017. O principal objetivo dessa política é ampliar a participação dos biocombustíveis na matriz de transportes brasileira, com base na previsibilidade e na sustentabilidade econômica, ambiental e social, contribuindo ainda para a redução das emissões de GEE no país. É uma política de Estado, voltada à descarbonização do setor de transporte, em linha com os compromissos que o Brasil assumiu mundialmente na Conferência do Clima, em Paris (2015).

Para a operacionalização da RenovaBio, a Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Ministério de Minas e Energia (SPG/MME) demandou à Embrapa Meio Ambiente o desenvolvimento de uma ferramenta que fizesse a contabilidade de carbono dos biocombustíveis participantes do programa. Essa ferramenta recebeu o nome de RenovaCalc. O desenvolvimento da RenovaCalc se iniciou em janeiro de 2017, quando a equipe da Embrapa buscou parcerias com a Unicamp (Universidade Estadual de Campinas), o LNBR (Laboratório Nacional de Biorrenováveis) – CTBE, à época – e Agroicone. Após 14 meses de trabalho conjunto, em fevereiro e março de 2018, a primeira versão da ferramenta foi validada junto ao setor produtivo, em evento que contou com representantes dos setores sucroenergético, do biodiesel, bioquerosene de aviação e biogás. Atualmente há nove rotas tecnológicas de produção listadas na RenovaCalc (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2022).

O desenvolvimento da RenovaCalc foi embasado na metodologia de ACV. Para a RenovaBio foi assumida a abrangência “do poço à roda”, que contabiliza todos os fluxos de material e energia consumidos pelos processos produtivos e emitidos para o meio ambiente, desde a extração de recursos naturais, aquisição ou produção e tratamento da biomassa, sua conversão em biocombustível, até sua combustão em motores, incluindo todas as fases de transporte. Embora a ACV considere várias categorias que caracterizam o perfil ambiental de um produto, como o objetivo da RenovaBio é promover a redução da emissão de gases de efeito estufa, foi eleita apenas a categoria de impacto “mudanças climáticas” (Folegatti-Matsuura et al., 2022)<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; CARDOSO, F. H.; PIGHINELLI, A. L. M. T.; RAMOS, N. P.; MORANDI, M. A. B.; MACIEL, V. G.; GAROFALO, D. T.; NOVAES, R. M. L.; SHIOSAWA, M. L.; NASCIMENTO, G. C. *Workbook for life cycle inventories of agricultural products, according to different methodological guides*. Jaguariúna: Embrapa, 2022. No prelo.

A RenovaCalc tem alguns diferenciais em relação a outras ferramentas para contabilidade de carbono de biocombustíveis: 1) permite trabalhar com dados primários, expressando o perfil específico do produtor de biocombustíveis; 2) apresenta toda a estrutura de cálculo aberta, para conhecimento público; 3) opera no software Microsoft Excel, de domínio geral. Essas características permitem que pessoas sem o embasamento teórico em ACV possam utilizar e compreender os cálculos processados e os resultados obtidos.

Em linhas gerais, a RenovaCalc apresenta dois conjuntos de dados a serem preenchidos pelo usuário: dados agrícolas de produção das biomassas e dados industriais da produção dos biocombustíveis. Para a fase agrícola de produção, são informadas as quantidades de insumos agrícolas consumidos, como corretivos, fertilizantes, diesel, eletricidade, além de volume de produção e área cultivada. Para a fase industrial, são demandados dados de rendimentos dos produtos e coprodutos, além dos consumos de combustíveis sólidos e líquidos e outros insumos necessários para produção dos biocombustíveis.

Após o preenchimento dos dados, a RenovaCalc estima as emissões de "background" relacionadas às etapas do ciclo de vida anteriores à etapa agrícola de produção, adotando o banco de dados ecoinvent e as emissões dos processos agrícola e industrial.

A RenovaCalc apresenta o total dessas emissões em g CO<sub>2</sub>eq/MJ do biocombustível, e por fase do ciclo de vida (agrícola, industrial, transporte e uso do biocombustível). A emissão total do biocombustível, ou intensidade de carbono (IC), é subtraída da IC de seu combustível fóssil equivalente (por exemplo, gasolina, no caso do etanol; ou diesel, para o biodiesel), resultando na Nota de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA), que representa a mitigação das emissões de GEE.

Com base na NEEA são calculados os Créditos de Descarbonização (CBios), negociados em bolsa de valores (na plataforma da B3), que correspondem a um novo produto para as usinas de biocombustíveis. Quanto mais eficientes os processos produtivos, maior a NEEA, mais CBios as usinas poderão comercializar e maior seu ganho econômico. Cada CBio corresponde a uma tonelada de CO<sub>2</sub>eq evitada. Com a "aposentadoria" dos CBios, efetiva-se a mitigação de emissões de GEE prevista nas metas anuais da RenovaBio.

## ICV CALC-EMBRAPA

A ICVCalc-Embrapa é uma ferramenta desenvolvida no software Microsoft Excel com o objetivo principal de construir inventários de ciclo de vida de processos agrícolas para estudos de ACV.

Abrangendo os principais protocolos metodológicos internacionais, a ICVCalc estima as emissões derivadas dos processos agrícolas para os diferentes compartimen-

tos ambientais, de tal forma que o usuário pode facilmente comparar os resultados das emissões entre os diferentes protocolos, ainda em nível de inventário.

A lógica proposta pela ferramenta é que o usuário tenha duas opções de inserção de dados: a) dados brutos ou b) dados previamente tratados. Na escolha da primeira opção, os dados são inseridos e tratados na planilha “PrimaryData”, destinada à inserção dos dados referentes à produção de uma cultura agrícola em uma safra, e na planilha “Allocation”, para culturas participantes de sistemas de produção, dedicada aos cálculos de alocação de cargas ambientais relacionadas ao consumo de insumos e operações agrícolas que são compartilhados entre os produtos agrícolas desse sistema. Já na segunda opção, na planilha “InputData”, o usuário insere os dados referentes à quantidade do fluxo (recursos da natureza ou da tecnosfera), na unidade de um hectare ou um quilograma de produto, previamente tratados fora da ferramenta.

Os protocolos metodológicos para o cálculo de emissões para processos agrícolas contidos na ICVCalc são a) Nemecek (Nemecek ; Schnetzer, 2012); b) WFLDB (Nemecek et al., 2015); c) Agri-footprint (Van Paassen et al., 2019); d) Agribalyse (Koch; Salou, 2020); e) IPCC (Calvo Buendia et al., 2019) e f) BR-Calc. Esse último foi desenvolvido pela Embrapa Meio Ambiente por meio da customização dos modelos presentes em outros protocolos que melhor representam os processos da agricultura brasileira, e inclui bancos de dados de clima e solo para as mesorregiões do país.

Para a melhor interação ferramenta-usuário, cada protocolo dispõe de duas planilhas: a) Calc, dedicada à inserção de parâmetros técnicos que alimentam os modelos ambientais específicos e, por vezes, exclusivos daquele protocolo em questão; b) LCI, destinada à exibição dos fluxos de entrada e saída (estimados pelo protocolo específico), que compõem o inventário completo do processo agrícola.

Na ICVCalc há ainda a planilha de “Emission Comparison”, que exhibe os resultados de emissões para os diversos compartimentos ambientais (ar, águas subterrâneas e superficiais, solo agrícola e natural) de acordo com cada protocolo que se escolheu trabalhar. Assim, é possível analisar as semelhanças e disparidades dos resultados obtidos, para maior robustez do estudo de ACV.

## AGRIOP

A AgriOp é uma ferramenta que faz parte da ICVCalc-Embrapa e é utilizada para modelar as operações agrícolas em estudos de ACV. Existem três formas de o usuário modelar suas operações agrícolas, a depender dos seus dados disponíveis.

Em primeiro lugar, na falta de dados primários relacionados à quantidade de diesel consumido e especificações do maquinário agrícola, recomenda-se utilizar o Tier 1, em que o usuário não fará qualquer modelagem, mas irá utilizar as operações agrícolas já existentes nas bases de dados do Ecoinvent.

Na segunda opção, quando o usuário tem dados de consumo de diesel para as operações agrícolas realizadas no sistema de produção que está sendo modelado, poderá optar pelo Tier 2. Basta informar, para cada operação agrícola, a quantidade de diesel consumida, bem como a porcentagem de biodiesel no combustível comercial utilizado, e a ferramenta apresentará o cálculo das emissões de 20 substâncias relacionadas à queima do combustível (Nemecek; Kägi, 2007).

A terceira opção da AgriOp é a modelagem por Tier 3. Essa opção é recomendada para quando o usuário tiver os dados primários relacionados aos maquinários agrícolas, tais como modelo e especificações técnicas (potência do motor, tamanho e tipo do implemento), rendimento operacional da máquina em hectare/hora e consumo de combustível. Além de fazer os cálculos das emissões devido à combustão do diesel, a ferramenta fará os cálculos relacionados à infraestrutura (isto é, quantos quilogramas de máquinas e implementos foram consumidos para se operar um hectare). O usuário, de posse dos fluxos de saída estimados pelo Tier 3 da AgriOp, será capaz de modelar em software de ACV uma operação agrícola "customizada", que represente mais fielmente seu sistema de produção (ao invés de usar uma operação já existente nas bases de dados, como no Tier 1). Essa modelagem conta com um grande diferencial, que é uma base de dados de maquinário agrícola, contendo parâmetros técnicos das máquinas e implementos, dados necessários para os cálculos relacionados à infraestrutura.

Para exemplificar, pode-se assumir que o usuário queira modelar uma operação de gradagem niveladora, utilizando uma grade de 40 discos e um trator de 250 cv. Para isso, basta selecionar essa opção de grade na lista pré-estabelecida da AgriOp, inserir a potência do trator, e a ferramenta automaticamente estimará a massa do trator. Como resultado, a AgriOp dará o perfil da operação agrícola necessário para a modelagem em software de ACV.

## Desafios e perspectivas

A emergência climática e a necessidade de avançar no desenvolvimento sustentável, representados pelos compromissos assumidos no Acordo de Paris e no alcance dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), requerem mudanças significativas nos sistemas agroalimentares. Qualquer novo padrão tecnológico terá de se nortear pela consolidação de sistemas de produção limpos, com balanço positivo de carbono, adoção de práticas de manejo adequadas a solos tropicais, investimentos na conservação e uso da biodiversidade e que integrem as cadeias, promovam a inclusão produtiva e gerem e remunerem as externalidades positivas.

Se no passado o aumento da produção era baseado na ampliação de área sem maior preocupação com as consequências ambientais e sociais, hoje o crescimento da

agricultura está pautado pelo ganho de desempenho e pela preocupação com o meio ambiente. Assim, os avanços em produtividade garantem efeitos poupa-recursos. Essa sustentabilidade concreta, mensurável e precificável entrou, definitivamente, na agenda dos sistemas agroalimentares globais.

Hoje, o Brasil é referência em ciência e tecnologia para a agricultura tropical. A safra de grãos do país ultrapassa os 250 milhões de toneladas, enquanto o uso da terra gira em torno de 30% do território nacional para produção agropecuária, aqui incluindo, grãos, frutas, hortaliças, culturas perenes, culturas energéticas, fibras e produção de proteína animal. É, portanto, imenso o potencial de crescimento do agronegócio brasileiro. Em todos os casos, a área plantada cresceu menos do que a produção, evitando mudança maior de uso da terra.

Os compromissos internacionais assumidos pelo Brasil em relação ao clima oferecem oportunidades também no setor de biocombustíveis e energia de biomassa. A matriz energética brasileira já contempla importante participação de energias renováveis. Entretanto, para o cumprimento das metas assumidas, há clara necessidade de uma efetiva transição para economia de baixo carbono, reduzindo as emissões devido à queima de combustíveis fósseis.

O Brasil tem um arcabouço legal e de políticas públicas ambientais robusto, que inclui o Plano Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC), a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), o Programa Nacional de Solos do Brasil (Pronasolos), o Programa Nacional de Bioinsumos, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc), a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais, a ratificação do Acordo de Nagoia sobre biodiversidade e outros marcos importantes.

Há ainda o Código Florestal que, mesmo ainda carecendo de plena implementação, é um balizador sem igual, pois permite haver Áreas de Preservação Permanente (APP) e de Reserva Legal (RL) convivendo com a área produtiva dentro das fazendas.

Nesse contexto, é fundamental o desenvolvimento e aprimoramento de métricas de avaliação de impactos que permitam destacar as vantagens competitivas da agricultura tropical e indicar os pontos de melhoria, rumo à descarbonização e minimização de outros impactos ambientais.

A ACV, por sua completude, transparência, robustez e credibilidade científica, tem se tornado a base para muitas certificações e para o estabelecimento de critérios que hoje se configuram como barreiras não tarifárias para inserção em mercados internacionais e para investimentos.

Entre os principais desafios para o avanço da aplicação da ACV na agricultura tropical, destacam-se:

- a. Aprimoramento de modelos e ferramentas para Mudança de Uso da Terra, incluindo a melhoria nas fontes de dados sobre a dinâmica do uso da terra, bem como nos dados de estoques de carbono no solo e biomassa.

- b. Aprimoramento de modelos de dispersão e fatores de emissão para substâncias originárias dos processos agropecuários e destinadas aos compartimentos ambientais, nas condições de solo e clima tropical, considerando a complexidade dos sistemas produtivos.
- c. Geração e inserção de dados de inventários de ciclo de vida atualizados em fóruns e bancos de dados internacionais para as principais cadeias de produtos e insumos agropecuários, que permitirão assegurar ao país maior confiabilidade na elaboração de inventários e avaliações de impacto. A geração de dados confiáveis e com credibilidade é essencial para garantir a competitividade da agropecuária brasileira e desmistificar uma imagem equivocada ou enviesada, corrigindo erros de rumo interno em nossas políticas públicas e iniciativas tanto de governo quanto do setor produtivo.
- d. Disponibilização de ferramentas de apoio à ACV.
- e. Geração da pegada de carbono e perfil ambiental dos principais produtos de exportação brasileiros.
- f. Integração das ferramentas de ACV com outros critérios e indicadores de sustentabilidade, incluindo a valoração das reservas de vegetação nativa associadas às paisagens rurais brasileiras.
- g. Disseminação da cultura de ACV nas cadeias agroalimentares, permitindo a integração e harmonização dos dados e da comunicação de impactos e externalidades.

A Embrapa Meio Ambiente, que desenvolve estudos de ACV para sistemas agropecuários desde 2009, destaca-se como referência sobre o tema no Brasil. A geração dos inventários e ferramentas, como as apresentadas neste capítulo, tem proporcionado uma intensa procura por parcerias em projetos. Além dos grãos e culturas energéticas, há a perspectiva de ampliação dos estudos para outras cadeias, incluindo fruteiras, pecuária e outros produtos de importância como café, amendoim e cacau.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo trouxe uma breve apresentação de algumas das demandas relacionadas a métricas e ferramentas de gestão aplicadas à avaliação de impactos ambientais da agricultura, e de como a Embrapa Meio Ambiente tem dedicado esforços para a construção de conhecimentos e ativos tecnológicos para o seu enfrentamento. Um bom caminho já foi trilhado, mas os desafios com os quais o País se defronta são enormes e continuam exigindo nossa dedicação.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **RenovaBio**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/renovabio>. Acesso em: 02 abr. 2022.

ALCÂNTARA, F. A.; FURTIN NETO, A. E.; PAULA, M. B.; MESQUITA, H. A.; MUNIZ, J. A. Adubação verde na recuperação da fertilidade de um latossolo vermelho-escuro degradado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 2, p. 277-288, 2000.

AMBROSANO, J. A.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G. M. B.; SCHAMMAS, E. A.; DIAS, F. L. F.; ROSSI, F.; TRIVELIN, P. C. O.; MURAOKA, T.; SACHS, R. C. C.; ZACÓN, R. Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 4, p. 810-818, 2011.

BARIZON, R. R. M.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; SCACHETTI, M. T.; SILVA, G. B. S. da; COSTA, M. P.; GAROFALO, D. F. T.; LANES, V. F. de; PICOLI, G.; PIGHINELLI, A. L. M. T.; MORANDI, M. A. B. **Modelo PestLCI**: parametrização para os cenários brasileiros de produção agrícola. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2021. 30 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 132). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1134598>. Acesso em: 25 jan. 2021.

BIRKVED, M.; HAUSCHILD, M. Z. PestLCI: a model for estimating field emissions of pesticides in agricultural LCA. **Ecological Modelling**, v. 198, p. 433-451, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.05.035>.

BLOK CONSULTANTS. **LUC Impact Tool. Full Dataset version 2021**. The Netherlands: Blok Consultants, Gouda, 2021.

BRANDÃO, M.; AZZI, E.; NOVAES, R. M.; COWIE, A. The modelling approach determines the carbon footprint of biofuels: the role of LCA in informing decision makers in government and industry. **Cleaner Environmental Systems**, v. 2, 100027, 2021.

BRENTON, P.; EDWARDS-JONES, G.; JENSEN, M. F. **Carbon footprints and food systems: do current accounting methodologies disadvantage developing countries?** Washington: The World Bank Publications, 2010. 71 p. (World Bank Study, 56798).

BRITO, T.; FRAGOSO, R.; MARQUES, P.; FERNANDES-SILVA, A.; ARANHA, J. LCA of soybean supply chain produced in the state of Pará, located in the Brazilian Amazon biome. **Biology and Life Sciences Forum**, v. 3, n. 1, p. 1-7, 2021.

BUENDÍA, E. C.; MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P. R. **Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. Geneva: IPCC, 2020. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM\\_Updated-Jan20.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/02/SPM_Updated-Jan20.pdf). Acesso em: 10 jan. 2022.

CASTANHEIRA, E. G.; FREIRE, F. Greenhouse gas assessment of soybean production: implications of land use change and different cultivation systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 54, n. 1, p. 49-60, 2013.

COSTA, M. P.; CHADWICK, D.; SAGET, S.; REES, R. M.; WILLIAMS, M.; STYLES, D. Representing crop rotations in life cycle assessment: a review of legume LCA studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 25, p. 1942–1956, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01812-x>.

DeFRIES, R. S.; FOLEY, J. A.; ASNER, G. P., 2004. Land-use choices: balancing human needs and ecosystem function. *Frontiers. Ecology and the Environment*, v. 2, n. 5, p. 249–257, 2004.

DIJKMAN, T. J.; BIRKVED, M.; HAUSCHILD, M. Z. PestLCI 2.0: a second generation model for estimating emissions of pesticides from arable land in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 17, p. 973–986, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0439-2>.

DINATO, R.; PICOLI, J. F.; FERNANDES, M.; KISS, B.; CHRYSSEAFIDIS, J. **Pegada de carbono da carne bovina brasileira exportada para a união européia**: resultados e premissas para o cálculo das emissões do ciclo de vida do produto. São Paulo: Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getulio Vargas, 2019. 151 p.

DONKE, A. C. G.; NOVAES, R. M. L.; PAZIANOTTO, R. A. A. Integrating regionalized Brazilian land use change datasets into the ecoinvent database: new data, premises and uncertainties have large effects in the results. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 25, p. 1027–1042, 2020.

EUROPEAN COMMISSION. **PEFCR feed for food producing animals**: version 4.1, abril 2018: data of expiration 31st December 2020. Disponível em: [https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR\\_feed.pdf](https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_feed.pdf). Acesso em: 15 mar. 2022.

FANTKE, P.; ANTÓN, A.; GRANT, T.; HAYASHI, K. Pesticide emission quantification for life cycle assessment: A global consensus building process. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 13, p. 245–251, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3370/lca.13.245>.

FAO. **FAOSTAT**. Disponível em: [https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries\\_by\\_commoditymoraes](https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commoditymoraes). Acesso em: 10 jan. 2022a.

FAO. **FAO Term Portal**: life cycle assessment. Disponível em: <https://www.fao.org/faoterm/viewentry/en/?entryId=168005>. Acesso em: 08 mar. 2022b.

FIGUEIRÊDO, M. C. B. de; KROEZE, C.; POTTING, J.; BARROS, V. da S.; ARAGÃO, F. A. S. de; GONDIM, R. S.; SANTOS, T. de L.; BOER, I. J. M. de. The carbon footprint of exported brazilian yellow melon. *Journal of Cleaner Production*, v. 47, p. 404–414, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.015>.

FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; CARDOSO, F. H.; PIGHINELLI, A. L. M. T.; RAMOS, N. P.; MORANDI, M. A. B.; MACIEL, V. G.; GAROFALO, D. T.; NOVAES, R. M. L.; SHIOSAWA, M. L.; NASCIMENTO, G. C. **Workbook for life cycle inventories of agricultural products, according to different methodological guides**. Jaguariúna: Embrapa, 2022. No prelo.

FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; DIAS, F. T.; PICOLI, J. F.; LUCAS, K. R. G.; DE CASTRO, C.; HIRAKURI, M. H. Life-cycle assessment of the soybean-sunflower production system in the Brazilian Cerrado. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 22, p. 492–501, 2017. DOI 10.1007/s11367-016-1089-6.

FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; PICOLI, J. F. **Life Cycle Inventories of Agriculture, Forestry and Animal Husbandry - Brazil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente. 2018. 143 p.

FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; SCACHETTI, M. T.; CHAGAS, M. F.; SEABRA, J. E. A.; MOREIRA, M. M. R.; BONOMI, A.; BAYMA, G.; PICOLI, J. F.; MORANDI, M. A. B.; RAMOS, N. P.; CAVALETT, O.; NOVAES, R. M. L. **RenovaCalcMD**: método e ferramenta para a contabilidade da intensidade de carbono de biocombustíveis no programa RenovaBio, 2022. Disponível em: [https://www.gov.br/amp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/consulta-e-audiencia-publica/2018/arquivos-consultas-e-audiencias-publicas-2018/cap-10-2018/cpio-2018\\_nota-tecnica-renova-calc.pdf](https://www.gov.br/amp/pt-br/assuntos/consultas-e-audiencias-publicas/consulta-e-audiencia-publica/2018/arquivos-consultas-e-audiencias-publicas-2018/cap-10-2018/cpio-2018_nota-tecnica-renova-calc.pdf). Acesso em: 31 mar. 2022.

FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; SCACHETTI, M.T.; CHAGAS, M.F.; SEABRA, J.E.A.; MOREIRA, M.M.R.; BONOMI, A.M.; BAYMA, G.; PICOLI, J.F.; MORANDI, M.A.B.; RAMOS, N.P.; CAVALETT, O.; NOVAES, R.M. **RenovaCalcMD**: método e ferramenta para a contabilidade da intensidade de carbono de biocombustíveis no programa RenovaBio, 2018. 58 p. Disponível em: <https://www.gov.br/amp/pt-br>. Acesso em: 31 mar. 2022.

FOLEGATTI-MATSUURAA, M. I. S.; SILVA, O. R. R. F.; NOVAES, R. M. L.; PICOLI, J. F. Life cycle assessment of sisal produced in semiarid regions in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NATURAL FIBERS, 4., 2019, Porto. **Smart sustainable solutions: book of abstracts**. Minho, Portugal: University of Minho, 2019. p. 416-417.

GAROFALO, D. F. T.; NOVAES, R. M. L.; PAZIANOTTO, R. A. A.; MACIEL, V. G.; BRANDÃO, M.; SHIMBO, J. Z.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. da S. F. Land-use change CO<sub>2</sub> emissions associated with agricultural products at municipal level in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 364, article 132549, 2022.

GAVRILOVA, O.; LEIP, A.; DONG, H.; MACDONALD, J. D.; GOMEZ BRAVO, C. A.; AMON, B.; BARAHONA ROSALES, R.; PRADO, A. del; LIMA, M. A. de; OYHANTÇABAL, W.; WEERDEN, T. J. van der; WIDIAWATI, Y. Emissions from livestock and manure management. In: CALVO BUENDIA, E.; TANABE, K.; KRANJC, A.; BAASANSUREN, J.; FUKUDA, M.; NGARIZE, S.; OSAKO, A.; PYROSHENKO, Y. SHERMANAU, P.; FEDERICI, S. (ed.). **Refinement to the 2006 guidelines for national greenhouse gas inventories. Agriculture, forestry and other land use**. Geneve: IPCC, 2019. v. 4. cap. 10. p. 10.9-10.167.

GENTIL, C.; FANTKE, P.; MOTTES, C.; BASSET-MENS, C. Challenges and ways forward in pesticide emission and toxicity characterization modeling for tropical conditions. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 25, n. 7, p. 1290-1306, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01865-6>.

HIRAKURI, M. H.; DEBIASI, H.; PROCÓPIO, S. de O.; FRANCHINI, J. C.; CASTRO, C. de. **Sistemas de produção: conceitos e definições no contexto agrícola**. Londrina: Embrapa Soja, 2012. 24 p. (Documentos/Embrapa Soja, n. 335).

JOINT RESEARCH CENTRE. Institute for Environment and Sustainability. **International reference life cycle data system (ILCD) handbook: general guide for life cycle assessment: detailed guidance**. Publications Office, 2010, Disponível em: <s://data.europa.eu/doi/10.2788/38479>. Acesso em: 10 jan. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040 environmental management of life cycle assessment: principles and framework**. Geneva. 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044 environmental management of life cycle assessment: requirements and guidelines**. Geneva. 2006b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14067:2018 greenhouse gases - carbon footprint of products — requirements and guidelines for quantification**. 2018. 46 p. Disponível em: [www.iso.org/standard/71206.html](http://www.iso.org/standard/71206.html). Acesso em: 02 fev. 2022.

KOCH, P.; SALOU, T. **AGRIBALYSE®: rapport méthodologique -volet agriculture**. Version 3.0; version initiale v1.0;2014. Angers, France: Ed ADEME, 2020. 319 p.

LAM, W. Y.; CHATTERTON, J.; SIM, S.; KULAK, M.; BELTRAN, A. M.; HUIJBREGTS, M. A. J. Estimating greenhouse gas emissions from direct land use change due to crop production in multiple countries. **Science Total Environment**, Article 143338, Part 2, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143338>.

MACIEL, V. G.; ZORTEA, R. B.; DA SILVA, W. M.; CYBIS, L. F. D.; EINLOFT, S.; SEFERIN, M. Life Cycle Inventory for the agricultural stages of soybean production in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 93, p. 65-74, 2015.

MAHMOOD, I.; IMADI, S. R.; SHAZADI, K.; GUL, A.; HAKEEM, K. R. Effects of pesticides on environment. In: Hakeem K., Akhtar M., and Abdullah S. (ed.). **Plant, soil and microbes**. Springer, Cham., 2016. p. 253-269. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-27455-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-27455-3_13).

MARKERT, N.; RHIEM, S.; TRIMBORN, M.; GUHL, B. Mixture toxicity in the Erft River: assessment of ecological risks and toxicity drivers. **Environmental Sciences Europe**, v. 32, n. 51, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00326-5>.

MELERO, C.; GENTIL, C.; PEÑA, N.; RENAUD-GENTIÉ, C.; FANTKE, P. **Documentation of air, soil, and water emission modelling in PestLCI Consensus model. OLCA-Pest deliverable 3.3., 2020**. Disponível em: [https://www.sustainability.man.dtu.dk/english/-/media/centre/qa/olca623pest/deliverables/olca-pest\\_d3-3\\_public.pdf](https://www.sustainability.man.dtu.dk/english/-/media/centre/qa/olca623pest/deliverables/olca-pest_d3-3_public.pdf). Acesso em: 31 mar. 2022.

MORITA, A. M.; MOORE, C. C. S.; NOGUEIRA, A. R.; KULAY, L.; RAVAGNANI, M. A. S. Assessment of potential alternatives for improving environmental trouser jeans manufacturing performance in Brazil, **Journal of Cleaner Production**, 119156, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119156>.

MOREIRA, M.; NOVAES, R. M. L.; SCACHETTI, M. T.; CHAGAS, M. F.; SEABRA, J. E. A.; MATSUURA, M. I. S. F.; RAMOS, N. P.; MORANDI, M. A. B.; BONOMI, A. Proposta de contabilização da mudança de uso da terra na política nacional de biocombustíveis (RenovaBio). In: Embrapa Meio Ambiente-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO DO CICLO DE VIDA, 6., 2018, Brasília, DF. **Anais...** Brasília, DF: Ibict, 2018.

MÜLLER-CARNEIRO, J.; DIAS, A. F.; BARROS, V. D. S.; GIONGO, V.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; BRITO DE FIGUEIRÊDO, M. C. Carbon and water footprints of Brazilian mango produced in the semiarid region. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 4, p. 735-752, 2019.

NASCIMENTO, G. C. do; SHIOSAWA, M. L.; SAVIOLI, J. P. P. D.; DOS SANTOS, A. B. G. F.; RODRIGUES, T. O.; PICOLI, J. F.; PIGHINELLI, A. L. M. T.; UGAYA, C. M. L.; FOLEGATTI, M. I. S. **Manual de validação de inventários convertidos de ecospold2 para ILCD**. Jaguariúna: [S.l.p.], 2020. Disponível em: [https://utfpr-ct-static-content.s3.amazonaws.com/gyro.ct.utfpr.edu.br/wp-content/uploads/2020/08/2-Manual-validac%C3%A7%C3%A3o-datasets-ecospold-ILCD\\_final.pdf](https://utfpr-ct-static-content.s3.amazonaws.com/gyro.ct.utfpr.edu.br/wp-content/uploads/2020/08/2-Manual-validac%C3%A7%C3%A3o-datasets-ecospold-ILCD_final.pdf). Acesso em: 31 mar. 2022.

NEMECEK, T.; BENGGOA, X.; LANSCH, J.; MOURON, P.; RIEDENER, E.; ROSSI, V.; HUMBERT, S. Methodological Guidelines for the Life Cycle Inventory of Agricultural Products, version 3.0. **World Food LCA Database (WFLDB)**. Lausanne and Zurich, Switzerland: Quantis and Agroscope, 2015.

NEMECEK, T.; BENGGOA, X.; LANSCH, J.; ROESCH, A.; FAIST-EMMENEGGER, M.; ROSSI, V.; HUMBERT, S. Methodological Guidelines for the Life Cycle Inventory of Agricultural Products, version 3.5. **World Food LCA Database (WFLDB)**, Lausanne and Zurich, Switzerland: Quantis and Agroscope, 2019.

NEMECEK, T.; FRICK, C.; DUBOIS, D.; GAILLARD, G. Comparing farming systems at crop rotation level by LCA. In: GEERKEN, T.; MATTSON, B.; OLSSON, P.; JOHANSSON, E. (ed.), **Proceedings of the International Conference on LCA in Foods**, Gothenburg. SIK, VITO, 2001. p. 65-69.

NEMECEK, T.; KÄGI, T. Life cycle inventories of agricultural production systems. **Ecoinvent Report**, n. 15. Zürich and Dübendorf: ART, 2007. 46 p.

NEMECEK, T.; SCHNETZER, J. **Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems**. Zurich, Data v3.0, 2012. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Freddy\\_Navarro-Pineda/post/How\\_to\\_easily\\_predict\\_the\\_leaching\\_of\\_heavy\\_metals\\_from\\_soils/attachment/59d61f9d79197b807797e0dc/AS%3A285638185242630%401445112858480/download/ART+2012+-+Methods+of+assessment+of+direct+field+emissions+for+agricultural+systems.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Freddy_Navarro-Pineda/post/How_to_easily_predict_the_leaching_of_heavy_metals_from_soils/attachment/59d61f9d79197b807797e0dc/AS%3A285638185242630%401445112858480/download/ART+2012+-+Methods+of+assessment+of+direct+field+emissions+for+agricultural+systems.pdf)

NOVAES, R. M. L.; TUBIELLO, F. N.; GAROFALO, D. F. T.; SANTIS, G.; PAZIANOTTO, R. A. AL.; MATSUURA, M. I. S. F. **Brazil's agricultural land, cropping frequency and second crop area: FAOSTAT statistics and new estimates**. Jaguariuna: Embrapa Meio Ambiente, 2022. 26 p.

NOVAES, R. M. L.; PAZIANOTTO, R. A. A.; BRANDÃO, M.; ALVES, B. J. R.; MAY, A.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S. Estimating 20-year land-use change and derived CO<sub>2</sub> emissions associated with crops, pasture and forestry in Brazil and each of its 27 states. **Global Change Biology**, v. 23, p. 3716-3728, 2017.

PERIN, A.; SANTOS, R.H.S.; URQUIAGA, S.; GUERRA, J.G.M.; CECON, P.R. et al. Produção de fitomassa, acúmulo de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio por adubos verdes em cultivo isolado e consorciado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 1, p. 35-40, 2004.

PICOLI, J. F.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; RAMOS, N. P.; CHAGAS, M. F.; CAVALETT, O.; SILVA, M. S. G. da Desempenho ambiental de cana de açúcar: sistema de produção convencional versus conservacionista. In: CONFERENCIA INTERNACIONAL DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN LATINOAMÉRICA, CILCA, 7., 2017, Medellín, Colômbia. [Anais ...]. Medellín: Universidad EAFIT, 2017. p. 156-158.

PICOLI, J. F.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; SEABRA, J. E. A.; BUNGENSTAB, D. J. Environmental profile of the integrated production of ethanol and beef cattle in Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIFE CYCLE ANALYSIS, 8., 2019, Cartago. **LCA for global competitiveness: proceedings**. Cartago: Red Iberoamericana de Ciclo de Vida, 2020. p. 233-237.

POORE, J.; NEMECEK, T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. **Science**, v. 360, n. 6392, p. 987-992, 2018.

RAMOS, N. P.; PIGHINELLI, A. L. M. T.; SOARES, D. J.; MACIEL, V. G.; MICHELOTTO, M. D.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S. Desempenho ambiental do amendoim produzido em sistema de rotação

com pastagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO DO CICLO DE VIDA, 7., 2021. **Anais...** [volume II]: UFRGS, 2021. Evento online. p. 57-61.

RODRIGUES, T. O.; SUGAWARA, E. T.; SILVA, D. A. L.; FOLEGATTI-MATSUURA, M. I. S.; BRAGA, T. E. N.; UGAYA, C. M. L. **Guia Qualidata**: requisitos de qualidade de conjuntos de dados para o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida. Brasília: Ibict, 2016. Disponível em: <https://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2017/05/Qualidata.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2022.

SAMPAIO, A. P. C.; SILVA, A. K. P.; AMORIM, J. R. de; SANTIAGO, A. D.; MIRANDA, F. R. de; BARROS, V. S.; SALES, M. C. L.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. de. Reducing the carbon and water footprints of Brazilian green coconut. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, n. 4, p. 707-723, 2021.

SEEG. **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para metas climáticas do Brasil – 1970 – 2020**. 2021. Disponível em: [https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG\\_9/OC\\_03\\_relatorio\\_2021\\_FINAL.pdf](https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/SEEG_9/OC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf). Acesso em: 31 mar. 2022.

SILVA, C. B.; VALENTE, L. M.; MATOS, E.; BRANDÃO, M.; NETO, B. Life cycle assessment of aquafeed ingredients. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 5, p. 995-1017, 2018.

TANG, F. H. M.; LENZEN, M.; MCBRATNEY, A.; MAGGI, F. Risk of pesticide pollution at the global scale. **Nature Geoscience**, v. 14, p. 206-210, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00712-5>.

TUBIELLO, F. N.; ROSENZWEIG, C.; CONCHEDDA, G.; KARL, K.; GÜTSCHOW, J.; XUEYAO, P.; OBLI-LARYEA, G.; WANNER, N.; QIU, S. Y.; BARROS, J.; FLAMMINI, A.; MENCOS-CONTRERAS, E.; SOUZA, L.; QUADRELLI, R.; HEIÐARSDÓTTIR, H. H.; BENOIT, P.; HAYEK, M.; SANDALOW, D. Greenhouse gas emissions from food systems: building the evidence base. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 6, 065007, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac018e>.

UHL, P.; BRÜHL, C. A. The Impact of Pesticides on Flower-Visiting Insects: A Review with Regard to European Risk Assessment. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 38, n. 11, p. 2355-70, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.4572>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME. **Life cycle assessment: what it is and how to do it**. Paris: UNEP, 1996. 91 p.

VAN MIDDELAAR, C. E.; CEDERBERG, C.; VELLINGA, T. V.; VAN DER WERF, H. M.; DE BOER, I. J. Exploring variability in methods and data sensitivity in carbon footprints of feed ingredients. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 4, p. 768-782, 2013.

VAN PAASSEN, M.; BRACONI, N.; KULING, L.; DURLINGER, B.; GUAL, P. **Agri-footprint 5.0**: part 2: description of data. The Netherlands: Gouda, 2019. Disponível em: <https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/10/Agri-Footprint-5.0-Part-2-Description-of-data.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2022.

WAGNER, S. A.; GIASSON, E.; MIGUEL, L. M.; MACHADO, J. A. D. (Org.). **Gestão e Planejamento de Unidades de Produção Agrícolas**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2010. (Série Educação a Distância). Disponível em: <http://www6.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derador15.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2022.



# AValiação de Impactos e Indicadores de Sustentabilidade para Gestão Ambiental de Atividades Rurais

*Geraldo Stachetti Rodrigues, Claudio César de Almeida Buschinelli, Daniela Maciel Pinto, Inácio de Barros, Nilza Patrícia Ramos, Priscila de Oliveira, Renan Milagres Lage Novaes e Roberto Manolio Valladão Flores*

## INTRODUÇÃO

O setor agropecuário brasileiro tem atravessado um período de franca expansão de capacidade produtiva e conquista de mercados. Independente da escala de produção ou do nível de capitalização, produtores cada vez melhor qualificados têm alcançado desde os mercados internacionais de *commodities* até nichos especiais – como a produção orgânica e a produção integrada – e atividades rurais diferenciadas – como o agroturismo. Esse processo de desenvolvimento inclui, como um eixo orientador convergente, a qualificação de formas de produção sustentáveis, independente do setor produtivo, da filiação tecnológica, ou da condição socioeconômica dos produtores (Mueller; Mueller, 2016). Para orientar esses objetivos de desenvolvimento sustentável, métodos para avaliação de impactos ambientais (AIA) têm sido desenvolvidos na Embrapa, integrando indicadores de sustentabilidade para a adoção de inovações tecnológicas (Ambitec-Agro, Rodrigues et al., 2003) e para a gestão ambiental de atividades rurais (APOIA-NovoRural, Rodrigues; Campanhola, 2003; Rodrigues et al., 2016a). Essas abordagens metodológicas, que são o foco do presente capítulo, têm sido amplamente empregadas em contextos de intensificação agropecuária e adoção de tecnologias, com resultados que representam exemplos de práticas e formas de manejo dirigidas à gestão ambiental para a sustentabilidade (Barros et al., 2016).

A principal hipótese que baliza o desenvolvimento dessas ferramentas e sua transferência ao setor produtivo é de que a implementação de mecanismos apropriados de gestão interfere transversal e positivamente no conjunto de indicadores de desempenho socioambiental, em todas as dimensões da sustentabilidade. Assim, à medida que os estabelecimentos rurais e as empresas do setor agropecuário aprimorarem

suas práticas de gestão ambiental, o conjunto da agricultura brasileira ampliará suas contribuições para a segurança alimentar e energética, conciliando integridade ecológica, viabilidade econômica e equidade social na realização das atividades produtivas rurais (Rodrigues et al., 2010b).

As AIAs representam um conjunto de procedimentos desenvolvidos com o intuito de permitir a previsão, a análise e as mitigações possíveis dos efeitos ambientais de projetos, planos e políticas de desenvolvimento que impliquem em alteração da qualidade ambiental. Dentre suas aplicações, encontram-se a avaliação de tecnologias agropecuárias e de suas potencialidades e possíveis implicações, positivas ou negativas, para o uso dos recursos naturais e a conservação da qualidade ambiental (Canter, 1986). A introdução de critérios da sustentabilidade nas AIAs resulta em complexos problemas metodológicos e de orientação político-conceitual, pois depende não só de definições dos limites para o uso sustentável de recursos e da capacidade regenerativa dos ecossistemas (Rockström et al., 2009), mas também do embate entre objetivos de conservação ambiental e de aumento de renda e atividade econômica; da repartição da produção e da riqueza; e das diferentes perspectivas de diversos agentes sociais (Flores et al., 1991). Harmonizar esses embates na busca de alternativas que promovam o desenvolvimento sustentável é o objetivo maior das AIAs. A missão institucional da Embrapa incorpora esses princípios ao estabelecer que a empresa deve “viabilizar soluções de pesquisa, desenvolvimento e inovação para a sustentabilidade da agricultura, em benefício da sociedade brasileira” (Embrapa, 2020).

## FERRAMENTAS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL E INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE NA EMBRAPA

Existe, à disposição dos avaliadores de impacto ambiental, um vasto arsenal metodológico, com inúmeros métodos descritos para os mais variados propósitos e situações, inclusive para projetos específicos do setor agropecuário (Bisset, 1987). No Brasil, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais (Ibama, 1995) e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) – por meio da Resolução Conama nº 1/1986 – definiram os principais instrumentos da política ambiental e os procedimentos para atendimento dos requisitos para AIA de projetos e empreendimentos, com breve descrição dos principais métodos.

Cada método de AIA apresenta especificidades, com respectivas vantagens e desvantagens, podendo-se assumir que a sua escolha depende dos objetivos e do alcance da avaliação. Em termos gerais, os métodos utilizados para a AIA de projetos, programas, planos e atividades produtivas podem ser classificados em sete tipos e suas integrações: métodos ad hoc; listas de verificação; matrizes de ponderação (incluindo

abordagens multicritério, utilidade multiatributo, avaliações de ciclo de vida); sobreposição de mapas; redes de interação; diagramas de sistemas; e modelos de simulação (Rodrigues, 1998). Adaptações de tais abordagens têm sido desenvolvidas e adaptadas em projetos de pesquisa na Embrapa, seja para apoiar a formulação de projetos (Rodrigues et al., 2000) em avaliações ex-ante, seja para a avaliação de impactos de tecnologias e inovações adotadas nos mais diversos contextos produtivos (por ex., Lanna et al., 2004; Rodigheri et al., 2006; Rodrigues et al., 2006; Tosto et al., 2006a, 2006b; Tupy et al., 2006a, 2006b, 2006c, 2006d, 2006e, 2006f, 2006g; Vinholis et al., 2006; Almeida et al., 2007; Carvalho et al., 2007; Duarte et al., 2007; Mori et al., 2007; Sa et al., 2008; Silva et al., 2008; Galharte; Crestana, 2010; entre muitos outros).

Entre esses sistemas de indicadores, constam estudos sobre o desempenho ambiental de sistemas biodiversos como os agroflorestais (Rodrigues et al., 2009), a análise de eficiência produtiva no uso de insumos e recursos naturais em consórcios e policultivos (Martins et al., 2021), além da consideração do conceito de ciclo de vida nas avaliações de impactos de tecnologias e da vulnerabilidade dos ambientes de adoção (Figueirêdo et al., 2010a, 2010b). Há estudos voltados a tipos específicos de inovações, tais como: as biotecnologias e as nanotecnologias (Jesus-Hitzschky et al., 2006, 2007); a análise de desempenho socioeconômico de sistemas de produção agropecuária (Ferreira et al., 2005); a contabilidade ambiental em múltiplas escalas, com base em síntese energética (Rodrigues et al., 2001, 2002; Barros et al., 2009, 2017; Reis et al., 2021); a gestão ambiental integrada de atividades rurais (Rodrigues et al., 2017, 2018); a valoração e certificação de serviços ambientais (Medeiros et al., 2007); e a organização de termos de referência de sustentabilidade para setores produtivos inovadores (Rodrigues et al., 2008). Essas iniciativas são um atestado do interesse suscitado pela plataforma de avaliação de impactos para o desenvolvimento dessa temática como estratégia de gestão tecnológica institucional.

Aliados aos métodos de AIA, há também abordagens que empregam estatística para estimar os impactos econômicos e sociais da agropecuária. Esses métodos são importantes porque mostram a viabilidade da adoção e a importância para demais agentes da sociedade. Do lado social, exemplos são o uso do Propensity Score Matching em diferenças para tratar das heterogeneidades de indivíduos e regiões (Flores; Pedroza Filho, 2019); o modelo Probit para avaliar as características demográficas que levam alguém a ser um produtor (Flores; Pedroza Filho, 2014); e o modelo de Heckman para tratamento de variáveis socioeconômicas truncadas (Flores, 2013). Do lado econômico, exemplos são o modelo autorregressivo de média móvel para estimativas de impactos econômicos através do tempo em uma única variável (Pedroza et al., 2014), e o modelo Logit de parâmetros aleatórios para cálculo do impacto das tecnologias nas características do produto final e a consequente mudança na disposição a pagar por parte dos consumidores (Flores et al., 2021).

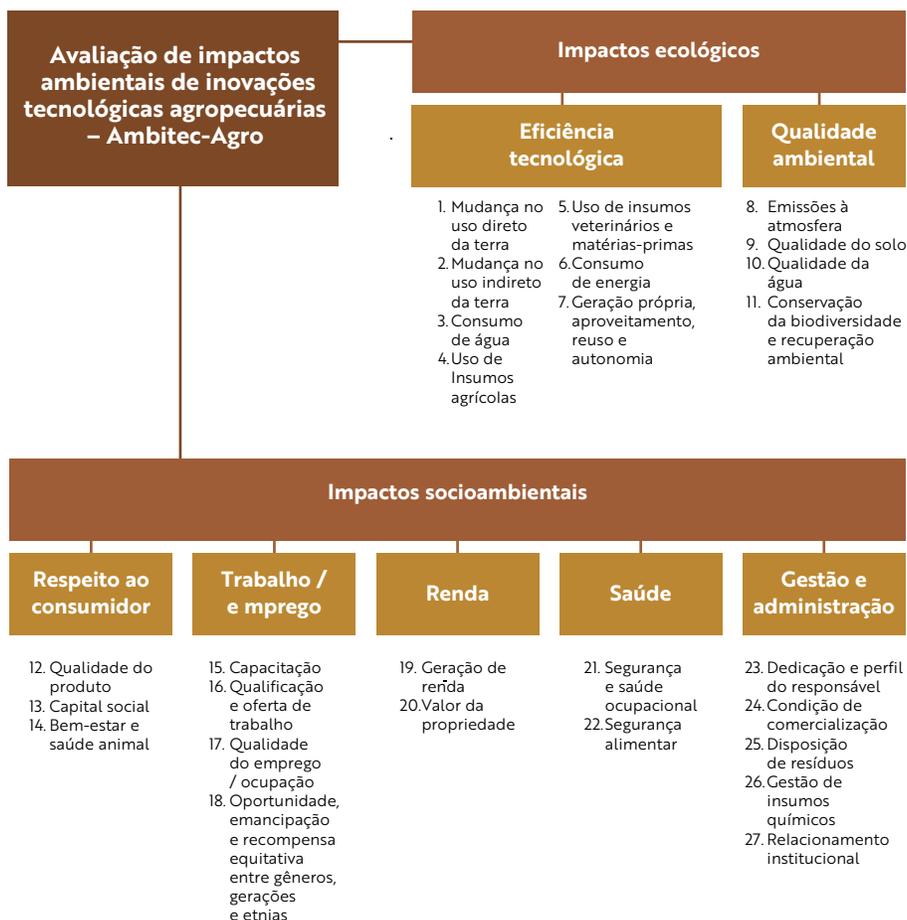
## MÉTODO AMBITEC-AGRO E SEUS MÓDULOS

Entre os processos constantes do Sistema Embrapa de Gestão, explicitados anualmente no Balanço Social institucional<sup>1</sup>, uma plataforma metodológica de referência (Avila et al., 2008) é indicada para que as Unidades Descentralizadas analisem o desempenho e relatem os impactos econômicos, ambientais e sociais das inovações tecnológicas transferidas e adotadas por produtores rurais ou utilizadas por outros agentes interessados nessas tecnologias. Compõe-se, assim, uma relevante base de dados para análise crítica dos resultados da pesquisa, gestão dos processos de transferência e definição de demandas complementares de desenvolvimento tecnológico (Avila et al., 2015).

Componente dessa plataforma, o sistema de indicadores Ambitec-Agro apresenta uma estrutura hierárquica simples, que parte da escala local (unidade de área, unidade animal ou recinto agroindustrial) do respectivo segmento agropecuário em avaliação (agropecuária, produção animal ou agroindústria), estendendo-se até a escala do entorno do empreendimento, e atenta para a qualidade dos ecossistemas e para a ampliação de sua capacidade produtiva (Irias et al., 2004). O conjunto de planilhas com os critérios e indicadores Ambitec-Agro permite a consideração de diversos aspectos de contribuição da inovação tecnológica para o desempenho socioambiental, incluindo a eficiência tecnológica, a qualidade ambiental, a conservação da biodiversidade e recuperação ambiental, na dimensão de impactos ecológicos, e o respeito ao consumidor, emprego, renda, saúde e gestão e administração, na dimensão de impactos socioambientais, em um conjunto de 27 critérios e 148 indicadores (Figura 11.1).

---

<sup>1</sup> Ver <https://www.embrapa.br/balanco-social>.



**Figura 11.1.** Conjunto de aspectos e critérios, nos quais se organizam os indicadores de impacto ambiental do sistema Ambitec-Agro.

Fonte: Rodrigues et al. (2016a).

Cada um destes critérios é construído em uma matriz de ponderação (Figura 11.2), na qual os indicadores são valorados conforme informações verificadas em campo, considerando o contexto produtivo local, as condições de manejo, além dos registros e conhecimento pessoal do adotante/responsável pelo empreendimento.

Nome do critério	Valores dos fatores de ponderação de importância dos indicadores			Nomes dos indicadores que compõem o critério				Verificação da soma dos fatores de ponderação de importância dos indicadores
Que alterações foram observadas na conservação da biodiversidade e na recuperação ambiental?								
Conservação da biodiversidade e recuperação ambiental	Variáveis de conservação da biodiversidade			Variáveis de recuperação ambiental				Averiguação fatores de ponderação
	Vegetação nativa	Fauna silvestre	Espécies / variedades tradicionais (caboclas)	Solos degradados	Ecossistemas degradados	Áreas de Preservação Permanente	Reserva Legal	
Fatores de ponderação k	0,1	0,1	0,1	0,15	0,15	0,2	0,2	1
Escala da ocorrência = Não se aplica Pontual 1 Local 2 Entorno 5								
				3		1	1	
	1	3	0		3			
Coefficiente de impacto = (coeficientes de alteração fatores de ponderação)	0,5	1,5	0	0,9	2,25	0,4	0,4	5,95
Valores dos fatores de ponderação da escala de ocorrência dos indicadores	Células para inserção dos coeficientes de alteração observados em campo			Índice de impacto parcial, referente a cada um dos indicadores		Índice de impacto integrado para o critério		
<b>pontual 1</b> (quando o impacto se restringe a um campo de cultivo, a uma instalação ou recinto de criação)	Grande aumento (>25%) +3 Aumento moderado (≤25%) +1 Indicador inalterado 0 Diminuição moderada (≤25%) -1 Grande diminuição (>25%) -3							
<b>local 2</b> (quando o impacto se estende além do pontual, mas não ultrapassa os limites da fazenda)								
<b>entorno 5</b> (quando o impacto extrapola os limites da fazenda)								

Figura 11.2. Exemplo de matriz de ponderação do Ambitec-Agro contendo os indicadores que compõem o critério “Conservação da biodiversidade e recuperação ambiental” e descrições do significado de cada campo da matriz.

Fonte: Rodrigues et al. (2016a).

Após a inserção de todos os coeficientes de alteração nas matrizes, o resultado é a expressão automática do índice de impacto da tecnologia, ponderado pelos fatores de escala da ocorrência e importância dos indicadores. Os resultados da avaliação são expressos graficamente por critério, em seguida por aspecto e, finalmente, nas dimensões e Índice de Impacto da Atividade (Figura 11.3), permitindo ao usuário visualizar o resultado em vários níveis de agregação.

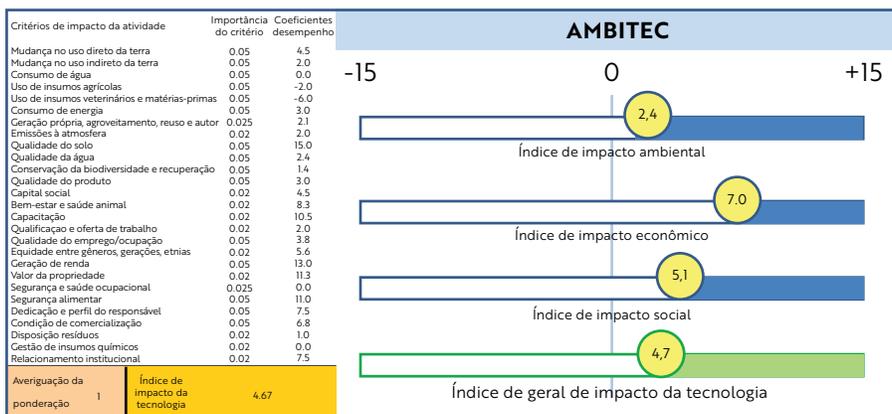


Figura 11.3. Exemplo de gráfico de saída do Ambitec-Agro contendo os índices de impacto. Fonte: Rodrigues et al. (2016a).

O sistema Ambitec-Agro está em uso no contexto institucional de pesquisa e desenvolvimento (P&D) na Embrapa para a avaliação de impactos ambientais das inovações tecnológicas oferecidas pelas Unidades Descentralizadas (Avila et al., 2015). Essas avaliações contribuem, de um lado, para apresentar à sociedade os resultados dos investimentos na pesquisa agropecuária (nos Balanços Sociais institucionais), e, de outro, para informar pesquisadores e administradores da pesquisa e da transferência de tecnologia sobre a relevância das avaliações de impactos como instrumentos para a adequação tecnológica e a sustentabilidade das atividades agropecuárias (Rodrigues et al., 2010a; Rodrigues, 2015).

Tal flexibilidade de aplicações tem favorecido o desenvolvimento de uma diversidade de módulos, dirigidos a sistemas e setores produtivos específicos. Entre as principais aplicações, citam-se módulos especiais dirigidos: a) à gestão ambiental da produção integrada de frutas, com especial referência às normas técnicas da produção integrada de morango (Buschinelli et al., 2016); b) à sustentabilidade socioambiental em sistemas agroindustriais com palma de óleo no estado do Pará (Monteiro et al., 2016); c) à avaliação de serviços ambientais no Programa Proambiente (Medeiros et al., 2007); d) à avaliação de impactos e transferência de tecnologias para controle do huanglongbing (HLB) dos citros (Rodrigues et al., 2016b); e) a tecnologias de produção de biocombustíveis e bioenergia (Souza et al., 2017; Porto et al., 2021); e f) à avaliação de impactos de tecnologias de informação e comunicação aplicadas à agropecuária (Pinto et al., 2020, 2021). Todos esses diferentes módulos são de acesso livre e estão disponíveis no portal da Embrapa.

As principais contribuições do sistema Ambitec-Agro podem ser listadas como:

1. viabilizar as AIAs em nível operacional, de forma ágil e com baixo custo, seja nas atividades produtivas ou nas de P&D, facilitando o entendimento das interações entre inovações tecnológicas e os indicadores socioambientais;
2. melhorar a compreensão de pesquisadores, produtores rurais e gestores sobre as implicações em um amplo espectro de indicadores socioambientais do desenvolvimento e adoção de inovações tecnológicas agropecuárias; e
3. melhorar a aceitação de métodos de AIA, de forma que sistemas teórica e metodologicamente mais sofisticados possam ser propostos e implementados.

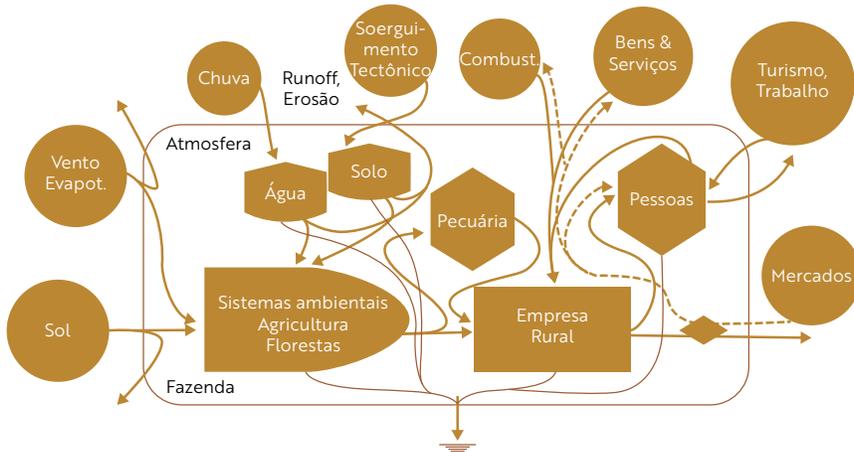
## MÉTODO APOIA-NOVORURAL E SEUS MÓDULOS

Com o objetivo de implementar a gestão ambiental integrada e a análise de sustentabilidade em bases analíticas e quantitativas, foi desenvolvido o sistema de Avaliação Ponderada de Impactos Ambientais de Atividades do Novo Rural (APOIA-NovoRural), também focado na adequação de desempenho das atividades produtivas, na adoção de tecnologias e formas de manejo, segundo os seguintes princípios:

- Ser aplicável à ampla variedade de atividades rurais, nas mais diversas regiões e situações produtivas, na escala específica do estabelecimento rural;
- Contemplar indicadores objetivos e quantitativos, em número adequado e suficiente para uma visão sistêmica dos aspectos ecológicos, econômicos, socio-culturais e de manejo implicados com o desenvolvimento local sustentável;
- Facilitar a detecção de pontos críticos para correção de manejo;
- Expressar os resultados em forma simples e direta para agricultores e empresários rurais, tomadores de decisão e o público em geral;
- Ser informatizado e fornecer uma medida final integrada de desempenho, contribuindo para a certificação ambiental em atendimento à demanda dos produtores e de suas organizações.

O sistema APOIA-NovoRural (Rodrigues; Campanhola, 2003; Rodrigues et al., 2010b) consta de 62 indicadores organizados em abordagem sistêmica, integrados em cinco dimensões de sustentabilidade, quais sejam: a) Ecologia da Paisagem; b) Qualidade Ambiental (atmosfera, água e solo); c) Valores Socioculturais; d) Valores Econômicos; e e) Gestão e Administração (Figura II.4). A dimensão “Ecologia da Paisagem” se refere à interface do estabelecimento rural com o ambiente natural e os possíveis efeitos da atividade em avaliação sobre o estado de conservação dos habitats. A dimensão “Qualidade Ambiental” se relaciona à geração de resíduos e poluentes nas unidades produtivas do estabelecimento nos compartimentos atmosfera, água e solo. A dimensão “Valores Socioculturais” se refere à qualidade de vida e inserção das pessoas nos processos produtivos. A dimensão “Valores

Econômicos” se refere aos atributos da renda e da valorização patrimonial. Finalmente, a dimensão “Gestão e Administração” se refere à interface entre o empreendimento e os mercados, relacionando-se à dedicação do responsável, condições de comercialização, disposição de resíduos, gestão de insumos e relacionamentos institucionais.



**1. Ecologia da Paisagem**

- 2. Fisionomia e condição dos habitats naturais
- 2. Diversidade e condições de manejo - áreas de produção
- 3. Diversidade e condições de manejo-atividades confinadas
- 4. Cumprimento com requerimento da reserva legal
- 5. Cumprimento com requerimento de áreas de preservação permanente
- 6. Corredores ecológicos
- 7. Diversidade da paisagem
- 8. Diversidade produtiva
- 9. Regeneração de áreas degradadas
- 10. Incidência de focos de doenças endêmicas
- 11. Risco de extinção de espécies ameaçadas
- 12. Risco de incêndio
- 13. Risco geotécnico

**2. Qualidade ambiental**

- Atmosfera**
- 14. Partículas em suspensão/fumaça
  - 15. Odores
  - 16. Ruídos
  - 17. Óxidos de carbono/hidrocarbonetos
  - 18. Óxidos de enxofre
  - 19. Óxidos de nitrogênio
- Água Superficial**
- 20. Oxigênio dissolvido
  - 21. Coliformes fecais
  - 22. DBO5
  - 23. pH
  - 24. Nitrito
  - 25. Fosfato
  - 26. Turbidez
  - 27. Clorofila a
  - 28. Condutividade
  - 29. Poluição visual da água
  - 30. Impacto potencial de pesticidas
- Água Subterrânea**
- 31. Coliformes fecais
  - 32. Nitrito
  - 33. Condutividade

**3. Valores Econômicos**

- 52. Renda líquida do estabelecimento
  - 53. Diversidade de fontes de renda
  - 54. Distribuição de renda
  - 55. Nível de endividamento corrente
  - 56. Valor da propriedade
  - 57. Qualidade da moradia
- Solo**
- 34. Matéria orgânica
  - 35. pH
  - 36. P resina
  - 37. K trocável
  - 38. Mg (e Ca) trocável
  - 39. Acidez potencial (H + Al)
  - 40. Soma de bases
  - 41. Capacidade de troca catiônica
  - 42. Volume de bases
  - 43. Potencial de erosão

**4. Valores Socioculturais**

- 44. Acesso à educação
- 45. Acesso a serviços básicos
- 46. Padrão de consumo
- 47. Acesso a esporte e lazer
- 48. Conservação do patrimônio histórico, artístico, arqueológico e espeleológico
- 49. Qualidade do emprego
- 50. Segurança e saúde ocupacional
- 51. Oportunidade de emprego local qualificado

**5. Gestão e Administração**

- 58. Dedicção e perfil do responsável
- 59. Condição de comercialização
- 60. Disposição de resíduos
- 61. Gestão de insumos químicos
- 62. Relacionamento institucional

**Figura 11.4.** Inserção das dimensões de sustentabilidade para integração de indicadores do sistema APOIA-NovoRural, segundo enfoque sistêmico de um estabelecimento rural. Fontes externas de matéria e energia são associadas a estoques internos, unidades ambientais e produtivas da fazenda representada no modelo, que, de um lado, exporta produtos e recebe a devida compensação dos mercados e, de outro, conecta-se via fluxos de reciclagem, retroalimentação e controle.

Fonte: Rodrigues et al. (2010b).

O conjunto de matrizes de ponderação multiatributo (escala normalizada entre 0 e 1, com linha de base modelada em 0,7 – Figura 11.5) permite a análise quantitativa e objetiva dos indicadores, em vistorias de campo realizadas com instrumentação analítica e dados gerenciais obtidos em diálogo com o produtor rural/responsável pelo estabelecimento. Para os indicadores da dimensão “Ecologia da Paisagem”, técnicas de geoprocessamento (com auxílio de GPS, mapas e imagens de satélite) são aplicadas na composição de croquis dos estabelecimentos estudados, incluindo acessos, limites e infraestrutura, assim como bases para os cálculos de usos agrícolas da terra e fisionomia dos habitats naturais. Indicadores relacionados à qualidade da água e do solo são obtidos em análises de campo e laboratório. Alguns indicadores de qualidade da água (oxigênio – O<sub>2</sub> –, pH, condutividade, turbidez) têm sido analisados rotineiramente no campo com sondas multiparâmetro (Horiba U-50); nitrato e fosfato, com colorímetro de campo (Merck RQFlex); e coliformes fecais têm sido estimados por meio de fitas de cultura (AlphaTecnoquímica). Amostras de água são levadas ao laboratório para determinação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e de clorofila em espectrofotômetro Hach, enquanto amostras de solo são rotineiramente enviadas a laboratórios de referência para análise de macronutrientes.

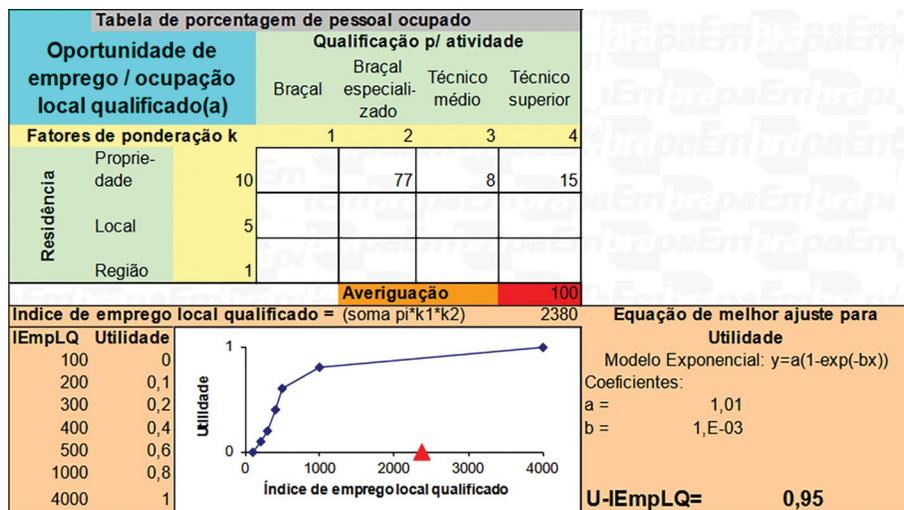
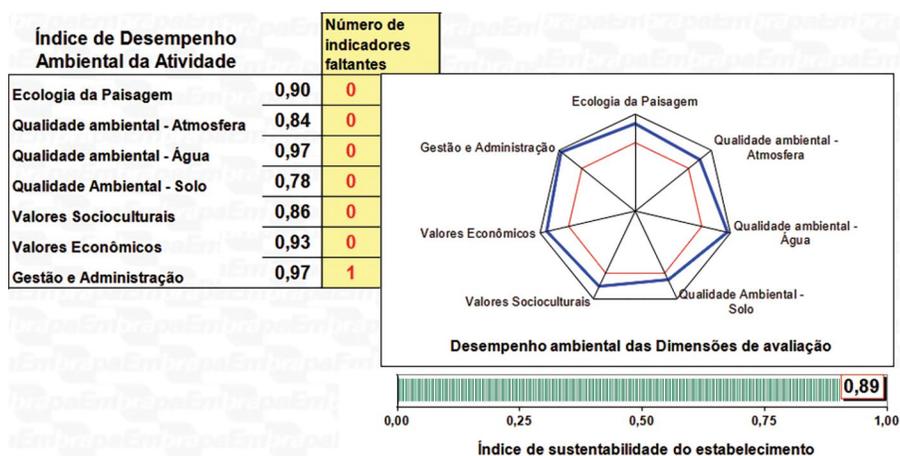


Figura 11.5. Exemplo de matriz de ponderação para o indicador “Oportunidade de emprego local qualificado”, do sistema de indicadores APOIA-NovoRural.  
 Fonte: Rodrigues et al. (2016a).

No exemplo da Figura 11.5, a matriz de ponderação consta de atributos do indicador (qualificação para a atividade e local de residência), fatores de ponderação correspondentes (k), células para entrada de dados, célula de averiguação da correção do preenchimen-

to (que, no caso, deve ser igual a 100% dos trabalhadores), expressão de cálculo do índice de impacto, tabela de correspondência, gráfico, equação e coeficientes para conversão do índice de impacto para valores de Utilidade (0–1, linha de base sempre modelada em 0,7). Verifica-se, no caso exemplificado, que 100% dos empregos gerados pela atividade foram ocupados por trabalhadores residentes na propriedade, sendo 77% em ocupação braçal especializada, 8% em nível técnico e 15% em ocupação técnica superior, resultando em um índice de emprego local qualificado igual a 2,380, que corresponde a um índice de desempenho para o indicador, em valor de Utilidade, igual a 0,95.

Resultados de estudos de campo são apresentados em gráficos para cada dimensão considerada, permitindo averiguar o desempenho do estabelecimento para cada indicador comparativamente à linha de base estabelecida (igual a 0,7). Os resultados são então agregados pelo valor médio de Utilidade para o conjunto de indicadores em cada dimensão e expressos em um gráfico-síntese de sustentabilidade nas cinco dimensões (Figura 11.6).



**Figura 11.6.** Apresentação gráfica de uma avaliação de impacto ambiental segundo as dimensões de avaliação do sistema APOIA-NovoRural, com os índices de desempenho ambiental nas diferentes dimensões de sustentabilidade, no âmbito de um estabelecimento rural.

Fonte: Rodrigues et al. (2016a).

A aplicação do sistema APOIA-NovoRural consiste em:

1. Identificar os limites espaço-temporais das atividades produtivas a serem avaliadas, no âmbito do estabelecimento rural; proceder ao levantamento de usos da terra e estimativas de emissões; coletar amostras de solo e água para análise laboratorial; e obter dados históricos e administrativos com o produtor/responsável.

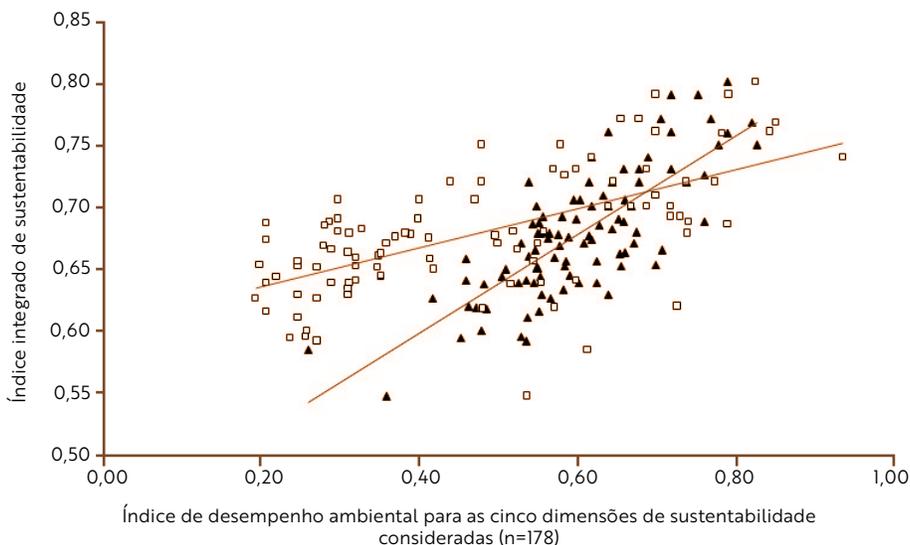
2. Inserir os dados nas matrizes de ponderação do sistema, obtendo os índices de impacto referentes aos indicadores, que são convertidos automaticamente para valores de Utilidade (escala de 0 a 1).
3. Agregar os índices de impacto por análise multiatributo, nas cinco dimensões componentes. Desse modo, obtém-se o índice geral da contribuição das atividades produtivas para a sustentabilidade do estabelecimento rural.
4. Analisar os resultados gráficos apresentados nas planilhas, identificando os indicadores que mais restringem a sustentabilidade e averiguando possíveis desconformidades com a linha de base.
5. Indicar medidas corretivas, recomendações de adequação tecnológica e de manejo para abatimento dos impactos ambientais negativos e promoção dos positivos.

Os resultados de desempenho ambiental das atividades rurais para cada indicador individual oferecem um diagnóstico para o produtor/administrador, apontando a situação de conformidade com padrões ambientais em cada aspecto dos impactos, nas condições do estabelecimento rural. Os gráficos agregados dos resultados para as diferentes dimensões de sustentabilidade proporcionam aos tomadores de decisão uma visão das contribuições (positivas ou negativas) das atividades produtivas para o desenvolvimento local sustentável, facilitando a definição de medidas de promoção ou controle das atividades no âmbito do território. Finalmente, o Índice de Impacto Ambiental se configura como uma unidade padrão de desempenho ambiental, servindo como uma medida objetiva para a qualificação e certificação de atividades agropecuárias. O sistema APOIA-NovoRural, portanto, é uma ferramenta útil tanto para os produtores – individualmente ou em grupos organizados –, como para os formuladores e gestores de políticas públicas, contribuindo para o desenvolvimento local sustentável (Rodrigues; Campanhola, 2003).

Análises de sustentabilidade têm sido realizadas com o método APOIA-NovoRural em uma ampla diversidade de contextos, nos mais variados ambientes, escalas e níveis de complexidade produtiva, desde pequenas unidades até grandes estabelecimentos rurais, de comunidades tradicionais e produtores familiares até empresas de alcance internacional no mercado de commodities (Rodrigues et al., 2010b). O método conta com adaptações para atender também a demandas internacionais, como o sistema de Evaluación de Impacto Ambiental Rural (EIAR-Uruguay, Rodrigues; Moreira-Viñas, 2007a, 2007b) e o Sistema de Evaluación Ponderada de Impacto Ambiental (SEPIA-Argentina, D'Angelcola; Delprino, 2021); além de um módulo especial dedicado à gestão de boas práticas de manejo na aquicultura (Portinho et al., 2021).

Essa ampla variedade de estudos evidencia uma importante hipótese de trabalho no que concerne à avaliação de impactos para gestão ambiental de atividades rurais. Ocorre que, no universo de estudos já realizados segundo a abordagem APOIA-

NovoRural, observa-se que as dimensões “Ecologia da Paisagem” e “Gestão e Administração” têm sido aquelas que mais proximamente se correlacionam com o índice integrado de sustentabilidade (Figura 11.7).



**Figura 11.7.** Resultados de estudos de caso realizados com o sistema APOIA-Novorural, mostrando a distribuição geral dos índices de desempenho ambiental nas dimensões consideradas e os índices integrados de sustentabilidade ( $n = 178$ ). As dimensões com maiores coeficientes de correlação, i.e., Ecologia da Paisagem (▲ –  $R = 0,78$ ) e Gestão e Administração (□ –  $R = 0,62$ ) estão enfatizadas com as linhas no gráfico. Fonte: Rodrigues et al. (2010b).

De um lado, a influência da dimensão “Ecologia da Paisagem” pode ser considerada previsível, dado o maior número de indicadores aí presentes (14 de 62) e certa interação com as condições de qualidade ambiental, em especial qualidade da água e da atmosfera. Por outro lado, a influência da dimensão “Gestão e Administração” (apenas cinco de 62 indicadores) traz uma interessante hipótese de trabalho: que procedimentos integrados de gestão ambiental permeiam o conjunto de indicadores e promovem a sustentabilidade de forma integrada. Em outras palavras, pode-se assumir que, para alcançar a sustentabilidade da agricultura, um bom caminho é promover a gestão ambiental dos estabelecimentos rurais, o que se obtém por meio da adoção de indicadores de desempenho e sistemas de avaliação de impactos, como os exemplificados no presente texto.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A AIA fornece ferramental metodológico para realização da gestão sustentável de atividades rurais. Os resultados das AIAs representam um instrumento documentado de avaliação de sustentabilidade, apropriado para a proposição de medidas voltadas à gestão ambiental dos estabelecimentos e ao desenvolvimento local sustentável. Com esse enfoque, as políticas públicas e os desenvolvimentos tecnológicos podem ser adaptados às condições de cada território, com fortalecimento da organização local. Os sistemas Ambitec-Agro e APOIA-NovoRural foram desenvolvidos pela Embrapa como ferramentas de avaliação de desempenho socioambiental ágeis e de livre acesso<sup>2</sup>. Dada a agilidade na obtenção de resultados que esses sistemas permitem, seu histórico de uso pela Embrapa e parceiros e seu amplo escopo de aplicações, espera-se que possam seguir sendo importantes aliados na avaliação de desempenho socioambiental de atividades rurais.

---

<sup>2</sup> <https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/1422/ambitec-agro---software-ambitec-agro>.  
<https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/1423/apoia-novo-rural---software-apoia-novo-rural>.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. O. de; MATOS, A. P. de; CARDOSO, C. A. L.; SANCHEZ, N. F.; TEIXEIRA, F. A.; ELIAS JUNIOR, J. **Avaliação de impactos da produção integrada de abacaxi no estado do Tocantins: um estudo de caso de um sistema em transição**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2007. 29 p. (Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical. Documentos, 167).
- AVILA, A. F. D.; RODRIGUES, G. S.; VEDOVOTO, G. L. (ed.). **Avaliação dos impactos de tecnologias geradas pela Embrapa: metodologia de referência**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 189 p.
- AVILA, A. F. D.; RODRIGUES, G. S.; VEDOVOTO, G. L.; PENTEADO FILHO, R. de C.; FONSECA JÚNIOR, W. C. Embrapa's experience on the impact assessment of agricultural R&D: 15 years using a multidimensional approach. In: IMPAR CONFERENCE, 2015, Paris. **Impacts of agricultural research: towards an approach of societal values: [proceedings...]**. Paris: INRA, 2015. 25 p.
- BARROS, I. de; BLAZY, J. M.; RODRIGUES, G. S.; TOURNEBIZE, R.; CINNA, J. P. Emergy evaluation and economic performance of banana cropping systems in Guadeloupe (French West Indies). **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 129, p. 437-449, 2009.
- BARROS, I. de; PACHECO, E. P.; CARVALHO, H. W. L. Integrated emergy and economic performance assessments of maize production in semiarid tropics: comparing tillage systems. **Journal of Environmental Accounting and Management**, v. 5, n. 3, p. 211-232, 2017.
- BARROS, I. de; MARTINS, C. R.; RODRIGUES, G. S.; TEODORO, A. V. **Intensificação ecológica da agricultura**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2016. 31 p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 208).
- BISSET, R. Methods for environmental impact assessment: a selective survey with case studies. In: BISWAS, A. K.; GEPING, Q. (ed.). **Environmental Impact Assessment for Developing Countries**. London: Tycooly International: 1987. p. 3-64.
- BUSCHINELLI, C. C. de A.; CALEGARIO, F. F.; RODRIGUES, G. S.; SERRA, A. L. de S.; SEMIS, J. B.; FERRARA, L.; ABRAÃO, J. B.; ADAMI, J. A.; MAZIERO, J. C. **Plano de gestão ambiental da produção integrada de morango: contribuição metodológica para a certificação**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016. 61 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 67).
- CANTER, L. W. **Environmental impacts of agricultural production activities**. Chelsea, MI: Lewis Publishers, 1986. 382 p.
- 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: 12 de agosto de 2021.
- CARVALHO, G. R.; FERNANDES, E. N.; MULLER, M. D.; OLIVEIRA, A. F. de. Avaliação dos impactos ambientais e sociais da tecnologia “capim elefante pioneiro no sistema de pastejo rotativo”. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL (SOBER), 14., 2007, Londrina. **Conhecimento para agricultura do futuro: anais...** Londrina: UEL, 2007. 10 p.
- D' ANGELCOLA, M. E.; DELPRINO, M. R. **Sistema de Evaluación Ponderada de Impacto Ambiental (SEPIA): una herramienta de trabajo para la gestión sostenible de los territorios**. Buenos Aires: INTA, 2021. 196 p.

DUARTE, J. de O.; GARCIA, J. C.; MATOSO, M. J.; SANTANA, D. P. **Avaliação dos impactos econômicos, sociais e ambientais da cultivar de sorgo granífero BR 304 na safra 2005/2006**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2007. 41 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 67).

FERREIRA, C. M.; SILVA, S. C. da; LANNA, A. C.; BARRIGOSI, J. A. F.; WANDER, A. E. Climatic zoning for upland rice in Brazil: economic, social and environmental impacts. In: TROPENTAG: CONFERENCE ON INTERNATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH FOR DEVELOPMENT, 2005, Stuttgart. **Proceedings...** Stuttgart: University of Hohenheim, 2005. 4 p.

FIGUEIRÊDO, M. C. B. de; RODRIGUES, G. S.; CALDEIRA-PIRES, A.; ROSA, M. F.; ARAGÃO, F. A. S. de; VIEIRA, V. P. P. B.; MOTA, F. S. B. Environmental performance evaluation of agro-industrial innovations - part 1: Ambitec-Life Cycle, a methodological approach for considering life cycle thinking. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, p. 1366-1375, 2010a.

FIGUEIRÊDO, M. C. B. de; RODRIGUES, G. S.; CALDEIRA-PIRES, A.; ROSA, M. F.; ARAGÃO, F. A. S. de; VIEIRA, V. P. P. B.; MOTA, F. S. B. Environmental performance evaluation of agro-industrial innovations - part 2: methodological approach for performing vulnerability analysis of watersheds. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, p. 1376-1385, 2010b.

FLORES, M. X.; QUIRINO, T. R.; NASCIMENTO, J. C.; RODRIGUES, G. S.; BUSCHINELLI, C. de A. **Pesquisa para Agricultura Auto-Sustentável: perspectivas de política e organização na Embrapa**. Brasília, DF: EMBRAPA-SEA, 1991. 28 p. (EMBRAPA-SEA. Documentos, 5).

FLORES, R. M. V. Avaliação do impacto do bolsa família na saúde e na qualidade de trabalho da mulher brasileira. **Revista de Economia Mackenzie**, v. 11, n. 2. p. 72-89, 2013.

FLORES, R. M. V.; PEDROZA FILHO, M. X. Effect of socio-economic variables on fish production of small farmers in Tocantins State, Brazil. **Journal of Agricultural Science and Technology B**, v. 4, p. 331-339, 2014.

FLORES, R. M. V.; PEDROZA FILHO, M. X. Measuring the impact of fish farming on regional development of poor cities: A case study on Ceará State, Brazil. **Journal of Applied Aquaculture**, v. 31, n. 4, p. 356-366, 2019.

FLORES, R. M. V.; WIDMAR, N. O.; QUAGRAINIE, K.; PRECKEL, P. V.; PEDROZA FILHO, M. X. Establishing linkages between consumer fish knowledge and demand for fillet attributes in brazilian supermarkets. **Journal of International Food & Agribusiness Marketing**, p. 1-21, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/08974438.2021.1900016>.

GALHARTE, C. A.; CRESTANA, S. Avaliação do impacto ambiental da integração lavoura-pecuária: Aspecto conservação ambiental no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 11, p. 1202-1209, 2010.

IBAMA. **Avaliação de impacto ambiental: agentes sociais, procedimentos e ferramentas**. Brasília, DF, 1995. 134 p.

IRIAS, L. J. M.; GEBLER, L.; PALHARES, J. C. P.; ROSA, M. F. de; RODRIGUES, G. S. Avaliação de impacto ambiental de inovações tecnológicas agropecuárias: aplicação do Sistema Ambitec. **Agricultura em São Paulo**, v. 51, n. 1, p. 23-40, 2004.

JESUS-HITZSCHKY, K. R. E. de; LANNA, A. C.; VIEIRA, F. D.; ABREU, A. L.; LIMA, D. U. A proposed risk assessment method for genetically modified plants. **Applied Biosafety**, v. 11, n. 3, p. 127-137, 2006.

JESUS-HITZSCHKY, K. R. E. de. Impact assessment system for technological innovation: INOVA-tec System. *Journal of Technology Management & Innovation*, v. 2, n. 2, p. 67-82, 2007.

LANNA, A. C.; FERREIRA, C. M.; BARRIGOSI, J. A. F. **Análise do impacto ambiental da cultivar de feijão BRS Pérola**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2004. 4 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Comunicado Técnico, 80).

MARTINS, C. R.; RODRIGUES, G. S.; BARROS, I. de. Assessment of economic and environmental performance in citrus-based intercropping systems. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 43, n. 1, p. 1-16, 2021.

MEDEIROS, C. B.; RODRIGUES, I. A.; BUSCHINELLI, C. C. de A.; RODRIGUES, G. S. **Avaliação de serviços ambientais gerados por unidades de produção familiar participantes do Programa Proambiente no Estado do Pará**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2007. 73 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 68).

MONTEIRO, K. F. G.; HOMMA, A. K. O.; MENEZES, A. J. E. de A.; SANTOS, J. C. dos; MOTA JÚNIOR, K. de A. A sustentabilidade socioambiental em sistemas agroindustriais com palma de óleo no estado do Pará. *Revista Desarrollo Local Sostenible*, v. 9, n. 26, p. 2-17, 2016.

MORI, C. de; SCHEEREN, P. L.; MINELLA, E.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. dos; LORINI, I. **Avaliação de impactos econômicos sociais e ambientais de algumas tecnologias geradas pela Embrapa Trigo**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2007. 46 p. (Embrapa Trigo. Documentos, 90).

MUELLER, B.; MUELLER, C. The political economy of the Brazilian model of agricultural development: Institutions versus sectoral policy. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, v. 62, p. 12-20, 2016.

PEDROZA, M. X.; BARROSO, R. M.; FLORES, R. M. V. Effects of non-tariff barriers on Brazilian fisheries exports to the Europe. *Agroalimentaria*, v. 20, n. 39, p. 33-50, 2014.

PINTO, D. M.; OLIVEIRA, P.; MINITTI, A. F.; MENDES, A. M.; VILELA, G. F.; CASTRO, G. S. A.; ROCHA, J. D.; BOGIANI, J. C.; NOGUEIRA JÚNIOR, L. R.; COSTA, C. C.; NOVAES, R. M. L.; RODRIGUES, G. S. **Ambitec-TICs: avaliação de impactos de tecnologias de informação e comunicação aplicadas à agropecuária**. Campinas: Embrapa Territorial, 2020, 31 p. (Embrapa Territorial. Documentos, 131).

PINTO, D. M.; OLIVEIRA, P.; MINITTI, A. F.; MENDES, A. M.; VILELA, G. F.; CASTRO, G. S. A.; NOGUEIRA JÚNIOR, L. R.; BOGIANI, J. C.; ROCHA, J. D.; NOVAES, R. M. L.; BARROS, I. de; RODRIGUES, G. S. Impact assessment of information and communication technologies in agriculture: application of the Ambitec-TICs method. *Journal of Technology Management & Innovation*, v. 16, n. 2, p. 91-101, 2021.

PORTINHO, J. L.; SILVA, M. S. G. M. e; QUEIROZ, J. F. de; BARROS, I. de; GOMES, A. C. C.; LOSEKANN, M. E.; KOGA-VICENTE, A.; ARAUJO, L. S. de; VICENTE, L. E.; RODRIGUES, G. S. Integrated indicators for assessment of best management practices in tilapia cage farming. *Aquaculture*, v. 545, article 737136, 2021.

PORTO, B. H. C.; SOARES, J. P. G.; RODRIGUES, G. S.; JUNQUEIRA, A. M. R.; CALDEIRA-PIRES, A. de A.; MARTINEZ, D. G.; KUNZ, A. Socioenvironmental impacts of biogas production in a cooperative agroenergy condominium. *Biomass and Bioenergy*, v. 151, p. 1-13, 2021.

REIS, J. C.; RODRIGUES, G. S.; BARROS, I. de; RODRIGUES, R. D. A. R.; GARRETT, R. D.; VALENTIM, J. F.; KAMOI, M. Y. T.; MICHETTI, M.; WRUCK, F. J.; RODRIGUES FILHO, S.; PIMENTEL, P. E. O.;

SMUKLER, S. Integrated crop-livestock systems: a sustainable land-use alternative for food production in the Brazilian Cerrado and Amazon. *Journal of Cleaner Production*, v. 283, p. 1-13, 2021.

ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, Å.; CHAPIN III, F. S.; LAMBIN, E.; LENTON, T. M.; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H.; NYKVIST, B.; DE WIT, C. A.; HUGHES, T.; VAN DER LEEUW, S.; RODHE, H.; SÖRLIN, S.; SNYDER, P. K.; COSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORELL, R. W.; FABRY, V. J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.; RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P.; FOLEY, J. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, v. 14, n. 2, article 32, 2009.

RODIGHERI, H. R.; IEDE, E. T.; PENTEADO, S. do R. C.; REIS FILHO, W. **Avaliação dos impactos do programa de manejo integrado de pragas para o controle da vespa-da-madeira em plantios de pinus no sul do Brasil.** Colombo: Embrapa Florestas, 2006. 5 p. (Embrapa Florestas. Comunicado Técnico, 158).

RODRIGUES, G. S. **Avaliação de impactos ambientais em projetos de pesquisas: fundamentos, princípios e introdução à metodologia.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 1998. 66 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 14).

RODRIGUES, G. S. **Avaliação de impactos socioambientais de tecnologias na Embrapa.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2015. 41 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 99).

RODRIGUES, G. S.; BARROS, I. de; EHABE, E. E.; SAMA-LANG, P.; ENJALRIC, F. Integrated indicators for performance assessment of traditional agroforestry systems in SouthWest Cameroon. *Agroforestry Systems*, v. 77, p. 9-22. 2009.

RODRIGUES, G. S.; BROWN, M. T.; ODUM, H. T. Sameframe: sustainability assessment methodology framework. In: BIENNIAL INTERNATIONAL WORKSHOP AVANCES IN ENERGY STUDIES, 3, 2002, Porto Venere. **Reconsidering the importance of energy.** Porto Venere: SGEeditoriali Padova, 2002. p. 605-613.

RODRIGUES, G. S.; BUSCHINELLI, C. C. de A.; AVILA, A. F. D. An environmental impact assessment system for agricultural research and development II: institutional learning experience at Embrapa. *Journal of Technology Management & Innovation*, v. 5, n. 4, p. 38-56, 2010a.

RODRIGUES, G. S.; BUSCHINELLI, C. C. de A.; IRIAS, L. J. M.; LIGO, M. A. V. **Avaliação de impactos ambientais em projetos de pesquisa II: avaliação da formulação de projetos-versão I.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 22 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa, 10).

RODRIGUES, G. S.; BUSCHINELLI, C. C. de A.; MUNIZ, L. R. Ostrich farming and environmental management tools: an overview. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, v. 48, p. 1308-1313, 2008.

RODRIGUES, G. S.; CAMPANHOLA, C. Sistema integrado de avaliação de impacto ambiental aplicado a atividades do novo rural. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 38, n. 4, p. 445-451, 2003.

RODRIGUES, G. S.; CAMPANHOLA, C.; KITAMURA, P. C. An environmental impact assessment system for agricultural R&D. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 23, n. 2, p. 219-244, 2003.

RODRIGUES, G. S.; KITAMURA, P. C.; SÁ, T. D. de A.; VIELHAUER, K. Sustainability assessment of slash-and-burn and fire-free agriculture in Northeastern Pará, Brazil. In: BIENNIAL EMERGY

CONFERENCE, 2., Gainesville. **Theory and applications of the emergy methodology**. Gainesville: University of Florida, 2001. p. 95-107.

RODRIGUES, G. S.; MARTINS, C. R.; BARROS, I. de. Sustainability assessment of ecological intensification practices in coconut production. *Agricultural Systems*, v. 165, p. 71-84, 2018.

RODRIGUES, G. S.; MOREIRA-VIÑAS, A. An environmental impact assessment system for responsible rural production in Uruguay. *Journal of Technology Management and Innovation*. v. 2, n. 1, p. 42-54. 2007a.

RODRIGUES, G. S.; MOREIRA-VIÑAS, A. **Manual de evaluación de impacto ambiental de actividades rurales**. Montevideo: IICA-PROCISUR, 2007b. 164 p.

RODRIGUES, G. S.; OLIVEIRA, P. de; NOVAES, R. M. L.; PEREIRA, S. E. M.; NICODEMO, M. L. F.; SENA, A. L. S.; BELCHIOR, E. B.; ALMEIDA, M. R. M. de; SANTI, A.; WRUCK, F. J. **Avaliação de impactos ambientais de sistemas de integração lavoura-pecuária- floresta conforme contexto de adoção**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2017. 38 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 110).

RODRIGUES, G. S.; PIMENTA, S. C.; CASARINI, C. R. A. **Ferramentas de avaliação de impactos ambientais e indicadores de sustentabilidade na Embrapa**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016a. 21 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 105).

RODRIGUES, G. S.; RODRIGUES, I. A.; TUPY, O.; CAMARGO, A. C. de; NOVO, A. L. M.; BONADIO, L. F.; TOKUDA, F. S.; ANDRADE, E. F.; SHIOTA, C. M.; SILVA, R. A. da. Avaliação socioambiental da integração tecnológica Embrapa Pecuária Sudeste para produção leiteira na agricultura familiar. *Agricultura em São Paulo*, v. 53, n. 2, p. 35-48. 2006.

RODRIGUES, G. S.; RODRIGUES, I. A.; BUSCHINELLI, C. C. de A.; BARROS, I. de. Integrated farm sustainability assessment for the environmental management of rural activities. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 30, n. 4, p. 229-239, 2010b.

RODRIGUES, G. S.; STUCHI, E. S.; GIRARDI, E. A. **Impactos ambientais e tecnologias de controle do Huanglongbing (HLB) dos citros: visão dos consultores técnicos**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016b. 35 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 68).

SA, C. P. de; BAYMA, M. M. A.; CARNEIRO JUNIOR, J. M. Aspectos econômicos e ambientais da utilização do amendoim forrageiro para a recria-engorda de bovinos de corte no Acre. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 46., 2008, Rio Branco. **Amazônia, mudanças globais e agronegócios: o desenvolvimento em questão**. Brasília, DF: Sober; Rio Branco: Ufac, 2008. 7 p.

SILVA, O. F. da; LANNA, A. C.; WANDER, A. E.; BARRIGOSI, J. A. F.; SANTOS, A. B. dos. Impacto socioeconômico e ambiental da soca de arroz produzida na microregião do Rio Formoso, estado do Tocantins. *Revista Redes*, v. 13, n. 1, p. 28-48, 2008.

SOUZA, D. T. de; CARDOSO, A. N.; ESQUIAGOLA, M. M. O.; SANTOS, G. S.; BRASIL, B. dos S. A. F.; CAPDEVILLE, G. de. **Avaliação de impacto socioeconômico e ambiental de inovações tecnológicas no contexto de biorrefinarias: o Sistema Ambitec-Bioenergia**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2017. 34 p. (Embrapa Agroenergia. Documentos, 23).

TOSTO, S. G.; BRANDÃO, E. S.; MACEDO, J. R. de; CAPECHE, C. L. **Avaliação de impacto ambiental - produção de tomate de mesa ecologicamente cultivado no município de São José de Ubá, RJ: uma aplicação do método Ambitec-Agro.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006a. 32 p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 105).

TOSTO, S. G.; CAPECHE, C. L.; FERRAZ, R. P. D.; ANDRADE, A. G. DE; BRANDÃO, E. S.; COSTA, J. R. P. F. da. **Avaliação de impacto ambiental: o caso do projeto "Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro – Tom Jobim": uma aplicação do método Ambitec-Agro.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006b. 33 p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 93).

TUPY, O.; PRIMAVESI, O. **Avaliação dos impactos econômicos, sociais e ambientais da Embrapa Pecuária Sudeste: análise estratégica de custos de produção de leite.** São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006a. 23 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 56).

TUPY, O.; VINHOLIS, M. de M.B.; PRIMAVESI, O.; BERNARDI, A.C de C. **Avaliação dos impactos econômicos, ambientais e sociais de tecnologia da Embrapa Pecuária Sudeste: casinha tropical - abrigo individual para bezerros.** São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006b. 27 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 58).

TUPY, O.; PRIMAVESI, O.; RODRIGUES, A. de A. **Avaliação dos impactos econômicos, sociais e ambientais de tecnologia da Embrapa Pecuária Sudeste: cultivar de cana-de-açúcar IAC86-2480, desenvolvida pelo IAC, testada e recomendada pela Embrapa Pecuária Sudeste para alimentação de bovinos.** São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006c. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 55).

TUPY, O.; VINHOLIS, M. de M. B.; SOUZA, G. B. de; NOGUEIRA, A. R. de A.; PRIMAVESI, O. **Avaliação dos impactos econômicos, sociais e ambientais de tecnologia da Embrapa Pecuária Sudeste: método alternativo para determinação de fibra em detergente neutro e detergente ácido.** São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006d. 43 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 59).

TUPY, O.; ANCHÃO, P. P.; VINHOLIS, M. de M. B.; PRIMAVESI, O.; BERNARDI, A. C. de C. **Avaliação de impactos econômicos, sociais e ambientais de tecnologia da Embrapa Pecuária Sudeste: sobressemeadura de aveia forrageira em pastagens tropicais irrigadas no período seco.** São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006e. 37 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 61).

TUPY, O.; PRIMAVESI, O.; CAMARGO, A. C. de. **Avaliação dos impactos econômicos, sociais e ambientais de tecnologia da Embrapa Pecuária Sudeste: técnicas de produção intensiva aplicadas a propriedades familiares produtoras de leite.** São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006f. 38 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 57).

TUPY, O.; PRIMAVESI, O.; BARBOSA, P. F. **Avaliação dos impactos econômicos, sociais e ambientais de tecnologia da Embrapa Pecuária Sudeste: utilização de touros da raça canchim em cruzamento terminal com fêmeas da raça nelore.** São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006g. 30 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 54).

VINHOLIS, M. de M. B.; PEDROSO, A. F.; PRIMAVESI, O.; TUPY, O.; BERNARDI, A. C. C. **Impactos econômico, social e ambiental de um abrigo individual móvel para bezerros.** *Interface Tecnológica*, v. 3, p. 73-82, 2006.

# USO DE BIOINDICADORES NA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE AMBIENTAL

*Mariana Silveira Guerra Moura e Silva, Marcos Eliseu Losekann, Alfredo José Barreto Luiz, Artur Jordão de Magalhães Rosa, Ana Maria Cirino Ruocco, Claudio Martín Jonsson, Cristiano Campos Mattioli, Everton Santos Dias, Hamilton Hisano, Hugo Henrique Lanzi Saulino, Josilaine Taeco Kobayashi, Kathia Cristhina Sonoda, Simone de Souza Prado, William Viveiros, João Roberto Correia, Renato Berlim Fonseca, Rafaela Fernandes Zanesco e Herbert Cavalcante de Lima*

## INTRODUÇÃO

Um indicador biológico, ou bioindicador, é um táxon/taxa selecionado com base em sua sensibilidade a algum carácter particular, que é avaliado para inferir algum atributo do meio em que ele vive. Assim, um organismo bioindicador, ou uma comunidade bioindicadora, pode substituir a mensuração direta de uma característica abiótica ou com relação à outra biota onde ele convive (Oertel; Salánki, 2003). Estes podem ser avaliados com base em presença/ausência, abundância relativa, sucesso reprodutivo, estrutura da comunidade (p. ex., composição e diversidade), função comunitária (estrutura trófica ou qualquer outra combinação) (Moog et al., 2018).

Este capítulo apresenta as diversas aplicações da ferramenta de biomonitoramento desenvolvidas em projetos de pesquisa da Embrapa Meio Ambiente nos últimos 20 anos. Os projetos e trabalhos relacionam-se à avaliação de impactos resultantes de atividades agropecuárias que afetam ecossistemas terrestres e aquáticos.

## BIOINDICADORES TERRESTRES

Bioindicadores terrestres são amplamente utilizados como indicadores de conservação/degradação de ambientes terrestres, ou seja, são capazes de evidenciar os impactos do manejo em determinados habitats, tais como alteração, destruição, contaminação, reabilitação, sucessão da vegetação, mudanças climáticas e, conseqüentemente, degradação dos solos e ecossistemas. A presença de determinados organismos em um habitat fornece informações sobre a situação ambiental a partir de suas reações quando expostos a diferentes tipos de degradação ambiental (Allaby, 1992; Mazzoni-Viveiros;

Trufem, 2004). As espécies bioindicadoras são divididas em indicadoras ambientais, ecológicas e de diversidade, cada um indicando alguma sensibilidade e/ou mudança no ambiente ou na biodiversidade. Os indicadores mais comumente utilizados são de qualidade e integridade ambiental (42%), de poluição e contaminação (18%) e de gestão e restauração de ecossistemas (18%) (McGeoch, 1998; Tibcherani et al., 2018).

Em geral, os trabalhos com invertebrados correspondem a aproximadamente 30% dos trabalhos com bioindicadores (Siddig et al., 2016; Tibcherani et al., 2018). Os insetos utilizados como bioindicadores terrestres destacam-se por ter taxonomia, ciclo e biologia bem conhecidos, apresentar características de ocorrência em diferentes condições ambientais ou ser restritos a determinadas áreas. Um fator limitante ao uso de bioindicadores sempre esteve atrelado à falta de taxonomistas especialistas em determinadas espécies, no entanto, após o desenvolvimento e a utilização de ferramentas de biologia molecular, esse problema foi contornado, impulsionando estudos que fazem uso de bioindicadores.

Entre os insetos terrestres utilizados como bioindicadores, encontram-se espécies pertencentes às ordens Coleoptera, Diptera, Hemiptera, Hymenoptera, Lepidoptera e Orthoptera, entre outras (Brown, 1997; Oliveira et al., 2014). Esses insetos estão relacionados a diversas atividades importantes, como a ciclagem de nutrientes, a decomposição, a produtividade secundária, a polinização, o fluxo de energia, a predação, a dispersão de sementes e a regulação das populações de plantas e de outros organismos (Price, 1984).

A ordem Coleoptera (besouros) é considerada a maior em termos de riqueza de espécies e apresenta elevada abundância de indivíduos nos mais diversos ecossistemas, podendo ser classificados como pragas agrícolas, polinizadores, dispersores de sementes, predadores e decompositores de matéria orgânica, formando, portanto, um maior grupo de insetos utilizados como bioindicadores de poluição do solo e poluição por metais. Besouros das famílias Carabidae, Cerambycidae, Chrysomelidae, Curculionidae e Elateridae destacam-se como bioindicadoras, principalmente por responderem rapidamente à modificação ou à fragmentação do ambiente (Didham, 1998; Triplehorn; Johnson, 2011; Oliveira et al., 2014; Sajjad, 2020).

Outra ordem de interesse de bioindicadores é a dos Hymenoptera, representados por abelhas, formigas e vespas. Esses insetos destacam-se pelas interações simbióticas que mantêm com outros grupos de organismos (parasitismo, predação, polinização, dispersão). De modo geral, os insetos desse grupo são sensíveis às mudanças ecológicas, principalmente àquelas referentes à estrutura, à composição da vegetação e, também, aos resíduos de moléculas de inseticidas, de fungicidas e de poluentes encontrados nas plantas. Essa sensibilidade tem sido utilizada como ferramenta para avaliar a qualidade dos ecossistemas em áreas de mineração e de agricultura e até mesmo em áreas urbanas (Lambert et al., 2012; Oliveira et al., 2014).

Insetos da ordem Diptera estão amplamente distribuídos em todos os continentes e em ambientes aquáticos, com alta capacidade de colonização, principalmente no estágio larval (Courtney; Merritt, 2008; Oliveira et al., 2014). São conhecidos como moscas, mosquitos e mutucas, e são importantes como decompositores, polinizadores e controladores biológicos (Triplehorn; Johnson, 2011; Oliveira et al., 2014).

Os insetos da ordem Lepidoptera também têm sido considerados bioindicadores, atuando em ecossistemas florestais e agrícolas como desfolhadores, decompositores, presas e hospedeiros de animais. Os acidentes ambientais, tais como desmatamento e queimadas, têm sido um dos fatores que afetam a riqueza, a abundância e a uniformidade da fauna de lepidópteros em diversas áreas do mundo (Hill et al., 1995; Spitzer et al., 1997).

Outro grupo de inseto que pode se destacar como bioindicador terrestre é o grupo dos cupins. Esses insetos pertencem à ordem Isoptera e são classificados como insetos sociais, porque vivem organizados em sistema de castas de indivíduos, podendo ser ápteros (sem asas) ou alados. Esses insetos contam com menos espécies descritas em relação às ordens mencionadas anteriormente, sendo a maioria encontrada em regiões tropicais e subtropicais. As principais espécies de cupins pertencem às famílias Kalotermitidae, Rhinotermitidae, Serritermitidae e Termitidae, sendo que a maior parte dos insetos coletados e registrados no Brasil pertencem à família Termitidae. Em altas infestações, os cupins são conhecidos por sua importância econômica como pragas de madeira e de outros materiais celulósicos. Os cupins, além de auxiliar na formação de matéria orgânica no solo, também ajudam a melhorar a qualidade física, haja vista os inúmeros túneis construídos por eles abaixo da superfície do solo. Apesar de serem conhecidos como pragas, somente uma pequena parte (em torno de 10%) pode causar danos econômicos (Melo; Silva, 2008; Prado, 2015). Dadas as dificuldades encontradas em avaliações desses insetos de hábitos subterrâneos, a Embrapa Meio Ambiente desenvolveu o método de amostragem de cupins utilizando iscas de papelão corrugado (Melo; Silva, 2008).

A isca em forma de rolos de papelão corrugado de 20 cm de comprimento e 8 cm de diâmetro são inseridas em buracos de 20 cm feitos no solo com a ajuda de um trado, deixando livre a extremidade superior. Melo e Silva (2008) utilizaram essas iscas em um experimento sobre o impacto do uso de lodo de esgoto em cultura de milho, localizado na área experimental da Embrapa Meio Ambiente, em Jaguariúna (SP), onde se testaram quatro doses de lodo (1N, 2N, 4N e 8N), com base na necessidade de nitrogênio pela cultura, comparadas com adubação convencional (NPK) e testemunha sem adubação (0). As iscas mostraram-se eficientes, pois coletaram as espécies *Rhynchotermes* sp. e *Syntermes* sp. nos tratamentos NPK, Lodo 1N e Lodo 2N, mostrando que essas espécies poderiam constituir bioindicadoras de qualidade do solo.

## BIOINDICADORES AQUÁTICOS

### Macroinvertebrados bentônicos

O termo “bioindicadores” foi criado por Kolkwitz e Marson (1909) ao se referirem a organismos aquáticos influenciados pela presença de poluição orgânica, em especial, esgoto doméstico.

A abordagem investigativa com uso de bioindicadores torna-se extremamente útil quando as condições ambientais são altamente variáveis e, principalmente, quando se torna difícil ou custoso obter essas medidas de maneira mais acurada (Rosenberg; Resh, 1993, 2010). Nesse contexto, as medições de variáveis químicas da água destacam-se como um bom exemplo desse caso, pois nelas ocorrem mudanças espaciais e temporais muito rápidas. Assim, as coletas de dados físico-químicos possibilitam somente uma mera caracterização momentânea do estado da qualidade do ambiente. Uma vez que alguns eventos são impossíveis de serem observados diretamente, a abordagem com uso de bioindicadores possibilita uma inferência das alterações ocorridas (Singh; Singh, 2020). Um bom exemplo são as mudanças na estrutura das comunidades de diatomáceas (algas), que, muitas vezes, podem indicar alteração de pH em um reservatório (Saxena et al., 2021) ou a determinação da concentração de mercúrio nos tecidos moles de peixes como possível indicador de contaminação por atividades de mineração (Nyeste et al., 2019).

Os macroinvertebrados aquáticos estão entre os principais grupos bioindicadores de alterações dos ecossistemas aquáticos, principalmente os de água doce, o que vem resultando em sua inclusão em diretrizes nacionais e internacionais para gestão do monitoramento da biodiversidade dos ecossistemas de água doce (Eriksen et al., 2021; Sumudumali; Jayawardana, 2021). Sua importância deve-se a sua atuação nos processos de decomposição da matéria orgânica morta, ciclagem de nutrientes (Sonoda, 2010a) e transferência de energia entre os diferentes níveis que estruturam diversas redes tróficas (Hauer; Resh, 2017). Geralmente, o estágio de vida sensitivo dos macroinvertebrados é a fase larval, a qual representa o período mais longo. Tal característica permite-lhes integrar os efeitos de variações de respostas às alterações ambientais em períodos curtos, resultando em informações relevantes para a interpretação de efeitos acumulativos (Johnson et al., 2012). Além disso, as comunidades de macroinvertebrados são formadas por diversas espécies, as quais apresentam uma ampla faixa de tolerância à poluição. A estrutura da comunidade muda frequentemente em resposta às alterações ambientais (Sonoda et al., 2009a; Moura e Silva et al., 2010; Sonoda et al., 2011, 2018a, 2018b), geralmente em formas previsíveis, as quais permitem o desenvolvimento de um biocritério para avaliar as influências antropogênicas (Rosenberg; Resh, 2010). Por exemplo, em córregos e rios poluídos por matéria orgânica ou metais,

a riqueza e a diversidade de macroinvertebrados são fortemente reduzidas. Em geral, as abundâncias do gênero *Chironomus* (Chironomidae □ Diptera) e oligoquetos da subfamília Tubificinae (Annelidae) aumentam sob o decréscimo de grupos mais sensíveis, tais como as ordens Ephemeroptera, Plecoptera e Trichoptera (Xu et al., 2014).

## Biomonitoramento com uso de macroinvertebrados aquáticos

Entre as principais métricas avaliadas em estudos de biodiversidade, destacam-se os índices de diversidade (p. ex., Shannon, Margalef e Simpson) e os índices bióticos, que combinam as abundâncias relativas (Sonoda, 2010b) sob a perspectiva de grupos taxonômicos sensíveis ou tolerantes em índices ou escores, as quais diferem de acordo com o tipo de ambiente e influência antrópica (Sonoda et al., 2009b). Entre os índices bióticos mais conhecidos, destacam-se: *Biological Monitoring Working Party* (BMWP), *Index of Biological Integrity* (IBI) e índice de Hilsenhoff. Abordagens multimétricas, que visam integrar um conjunto de variáveis, as quais representam diversos atributos estruturais e funcionais de um ecossistema, também são empregadas em inferências ecológicas. Já as multivariadas foram inicialmente introduzidas para avaliar o *status* biológico. Essa abordagem emprega análise estatística para prever padrões específicos de fauna, em que são esperadas as ausências em locais impactados comparada com aquelas em locais de referência.

Abordagens funcionais, como as análises de grupos alimentares, são componentes-chave para o Conceito de Rio Contínuo (River Continuum Concept - RCC) (Van note et al., 1980). Os grupos alimentares têm sido mais comumente utilizados para as análises comparativas de abundâncias absolutas, abundâncias relativas, razões entre dois grupos ou índices compostos que incluem diferentes níveis tróficos. A seleção de abordagem apropriada para análise de comunidades de macroinvertebrados aquáticos dependerá da questão a ser analisada e dos recursos disponíveis.

## Resolução taxonômica

Os trabalhos de biomonitoramento utilizando macroinvertebrados aquáticos têm utilizado, em sua maioria, as categorias taxonômicas família ou classe. Essa ausência de refinamento taxonômico em nível de espécie é um limitante na utilização de macroinvertebrados nos trabalhos de biomonitoramento, uma vez que em uma mesma família ou classe podem existir gêneros ou espécies que respondem de maneira diferente às variações ambientais, o que pode influenciar os resultados de tais estudos. Um dos fatores que contribui para esse “gargalo” taxonômico é a dificuldade de se encontrarem especialistas disponíveis para os diferentes grupos taxonômicos (Landeiro et al., 2012). Outro fator que dificulta o refinamento taxonômico em categorias mais

específicas é o baixo número de espécies com estágios imaturos associados. Na ordem Trichoptera por exemplo, das pouco mais de 15.000 espécies descritas no mundo, somente 2% apresentam os estágios imaturos conhecidos (Holzenthal et al., 2007).

Diversos estudos têm explorado abordagens multivariadas a fim de corroborar as respostas de diferentes níveis de classificação taxonômica de macroinvertebrados aquáticos. Em geral, as conclusões são que a classificação em nível de família apresenta uma boa resposta aos impactos, no entanto, tal resultado só é obtido quando as comunidades são analisadas em grandes escalas espaciais (p. ex., bacias hidrográficas e biomas) e em consideração à dimensão das alterações sob os ambientes aquáticos (p. ex., uso da terra, desmatamento) (Buss; Vitorino, 2010). O uso de níveis taxonômicos de menor resolução poderia levar à perda de informações e a generalizações dos aspectos ecológicos, impedindo, assim, que se analise a extensão de mudanças comunitárias mais sutis (Orlofske; Baird, 2013).

## DNA Barcoding

A obtenção de dados taxonômicos detalhados é um desafio decorrente, entre outros fatores, de recursos taxonômicos limitados, espécies crípticas, tamanho pequeno, espécimes danificados e polimorfismo, que podem dificultar ou impossibilitar a identificação ao nível da espécie. O método conhecido por em código de barras de DNA (DNA barcoding) vem sendo visto como uma alternativa à taxonomia morfológica, podendo ser utilizado rotineiramente no biomonitoramento (Hebert et al., 2003, 2004; Stoeckle; Hebert, 2008; Borisenko et al., 2009; Janzen et al., 2009). O código de barras é um método de identificação de táxons com base na avaliação de uma região do gene mitocondrial citocromo c oxidase subunidade I (COI) de 658 pares de bases (bp) (Hebert et al., 2003) e comparação com as sequências de uma biblioteca referência, como os sistemas Barcode of Life Data (Ratnasingham; Hebert, 2007) e NCBI (Altschul et al., 1990). Assim como qualquer técnica relativamente nova, o código de barras de DNA apresenta potenciais vantagens e desvantagens. As vantagens incluem o potencial para obter identificações taxonômicas em menos tempo e o potencial para aumento da sensibilidade da métrica associado à resolução taxonômica melhorada (Waite et al., 2004, Chessman et al., 2007). Desvantagens potenciais incluem a necessidade de desenvolver e manter a capacidade de realizar extração de DNA e sequenciamento genético, a dependência da existência de bibliotecas de referência robustas e a capacidade bioinformática de gerenciamento de dados.

Como exemplo, Zhou et al. (2010) empregaram código de barras DNA, o que resultou em um aumento de cinco vezes no número de táxons de Ephemeroptera, Plecoptera e Trichoptera (EPT), sendo que as melhorias foram mais marcantes para espécies raras, as quais podem ser indicadoras de habitat específico ou condições de quali-

dade da água. Pilgrim et al. (2011) detectaram até três vezes mais larvas de táxons de EPT, que foram previamente documentadas na região de Maryland (Estados Unidos). Sweeney et al. (2011) verificaram que, ao calcular a média de todas as ordens de insetos aquáticos, apenas 51% dos espécimes que foram identificados em nível de espécie pelo código de barras puderam ser identificado por taxonomistas especialistas, em decorrência de dificuldades como condição de preservação do espécime, tamanho, nível de maturidade ou falta de chaves taxonômicas.

## BIOMONITORAMENTO EM BACIAS HIDROGRÁFICAS (COMUNIDADE DE INSETOS AQUÁTICOS: AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AGRÍCOLAS E DE USO DA TERRA)

Em teoria, quanto maior for a diversidade de micro-habitats em um trecho de rio, maior será a biodiversidade aquática. Assim, alterações antrópicas, como a erosão das margens e o assoreamento, tendem a homogeneizar o leito dos rios, levando à perda ou diminuição da riqueza taxonômica (Silveira, 2004). Agrotóxicos que entram nos rios, principalmente naqueles sem mata ciliar, também podem causar impactos significativos, alterando a estrutura da comunidade bentônica. O projeto Bacia dos rios Camanducaia e Jaguari (BACAJA), com área de estudos entre Minas Gerais e São Paulo, buscou avaliar o impacto de atividades agrícolas sobre a qualidade da água em rios de cabeceira. Os municípios estudados foram: Monte Verde (MG), Extrema (MG) e Munhoz (SP). Apesar de a qualidade físico-química da água ter se mostrado boa em todos os pontos (oxigênio dissolvido maior que 6 mg/L), a fauna macrobentônica apresentou redução da riqueza de táxons nos locais mais impactados (47 táxons em Monte Verde, local mais preservado, contra 35 no local mais impactado, Toledo). Além disso, o número de táxons considerados sensíveis a impactos (Ordens Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, EPT) foi maior no local mais preservado (15,9% em Monte Verde; 9,3% em Extrema; e 7,6% em Munhoz). De maneira análoga, em outro projeto com participação da Embrapa Meio Ambiente, financiado pela Fapesp, observou-se maior participação da família Calamoceratidae (ordem Trichoptera) em locais com mata ciliar preservada do que em locais sem mata ciliar (Moura; Silva et al., 2010). Essa família é fragmentadora, e as larvas desse inseto aquático utilizam as folhas que caem nos córregos como recurso de alimento e para construção de seus abrigos.

Tais pesquisas evidenciam a aplicabilidade do uso dos macroinvertebrados bentônicos como bioindicadores de qualidade de água e da saúde ambiental em bacias hidrográficas (Silveira, 2004; Sonoda 2010a, 2010c; Monteles et al., 2021). Seu uso tem várias vantagens, por exemplo, o aspecto relativamente sésil dos animais, o que permite que sirva de testemunha de impactos por um tempo relativamente longo. Junto

com as medidas físico-químicas de qualidade de água, fornecem um diagnóstico mais preciso da situação ambiental do corpo d'água.

### **Biomonitoramento na aquicultura: viveiros escavados**

No Brasil, a aquicultura iniciou-se em meados da década de 1970 com a produção de alevinos para o peixamento da tilápia-do-nylo (*Oreochromis niloticus*), vindo a se firmar como atividade empresarial após dez anos, com o surgimento de empreendimentos pioneiros (Figueiredo Júnior; Valente Júnior, 2008). A tilápia-do-nylo, assim como diversas espécies de ciclídeos, tem apresentado um aumento contínuo na produção mundial, representando 1,6 milhões de toneladas. Apesar de ser uma espécie exótica, a tilápia-do-nylo se adaptou muito bem às condições ambientais do país, sendo atualmente produzida em diversos estados brasileiros, dos quais se destacam o Ceará e o Paraná. Segundo levantamento de 2004, esses estados apresentaram uma produção de 18.000 e 12.000 toneladas/ano, respectivamente, representando quase 45% da produção no Brasil (Figueiredo Júnior; Valente Júnior, 2008).

Todavia, é importante ressaltar que a atividade aquícola pode acarretar alterações na qualidade da água dos reservatórios e impactar, inclusive, a própria produção pesqueira. O processo de eutrofização é um exemplo no qual ocorre a redução do oxigênio dissolvido na água (Simões et al., 2008; Mallasen et al., 2012; Rosini et al., 2019), influenciando a sanidade do peixe, a qualidade do produto e a eficiência do sistema produtivo. Assim, são importantes o aperfeiçoamento do manejo e a gestão ambiental nesse setor, a fim de assegurar uma ampliação sustentável da aquicultura no país.

Em sistemas de produção de peixes, poucos estudos utilizam a fauna bentônica como bioindicadora da qualidade da água; na maioria das vezes, os estudos referem-se aos impactos a jusante das propriedades da aquicultura (Stephens; Farris, 2004; Ansah et al., 2013). Não existem protocolos ou índices baseados em organismos bentônicos desenvolvidos especialmente para viveiros de peixes no Brasil. Também existem poucos estudos baseados na colonização de macroinvertebrados em viveiros de peixes (Řezníčková et al., 2016). Nesse contexto, a Embrapa Meio Ambiente tem realizado estudos exploratórios em áreas de cultivo localizadas em viveiros escavados no interior paulista (municípios de Mogi Mirim e Itapira) e em grandes reservatórios, como os de Ilha Solteira (SP/MS) e Chavantes (SP/PR), nos quais se encontram as criações por meio do uso de tanques-rede.

No estudo em viveiros escavados, quatro produtores de tilápia foram acompanhados por três meses quanto à avaliação quinzenal da qualidade físico-química da água e quanto às comunidades macrobentônicas colonizadoras de substrato artificial. Os coletores utilizados continham brita, argila expandida e bucha vegetal, envoltos em sacos de fruta de náilon de 5 kg (Figura 12.1).



Foto: Mariana Silveira G. M. Silva

Figura 12.1. Produtor de tilápia com coletor com substrato artificial para uso do biomonitoramento.

A cada 15 dias, os coletores eram retirados e trocados por novos coletores em três áreas dos viveiros: entrada da água, meio do viveiro e saída da água. Os principais resultados indicaram uma dominância muito alta de Chironomidae (acima de 85% em todos os coletores). Porém, alguns táxons considerados mais sensíveis, como a família Polycentropodidae (Ordem Trichoptera), estavam presentes em pisciculturas com águas de melhor qualidade e com presença de mata ciliar no ambiente de entorno (pisciculturas B e D) (Figura 12.2)

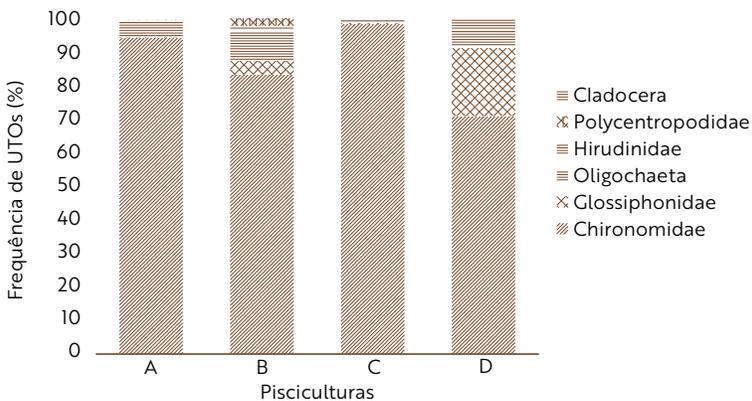


Figura 12.2. Frequência de UTOs de macroinvertebrados bentônicos em fazendas com produção de tilápia-do-nilo em viveiros escavados no interior paulista.

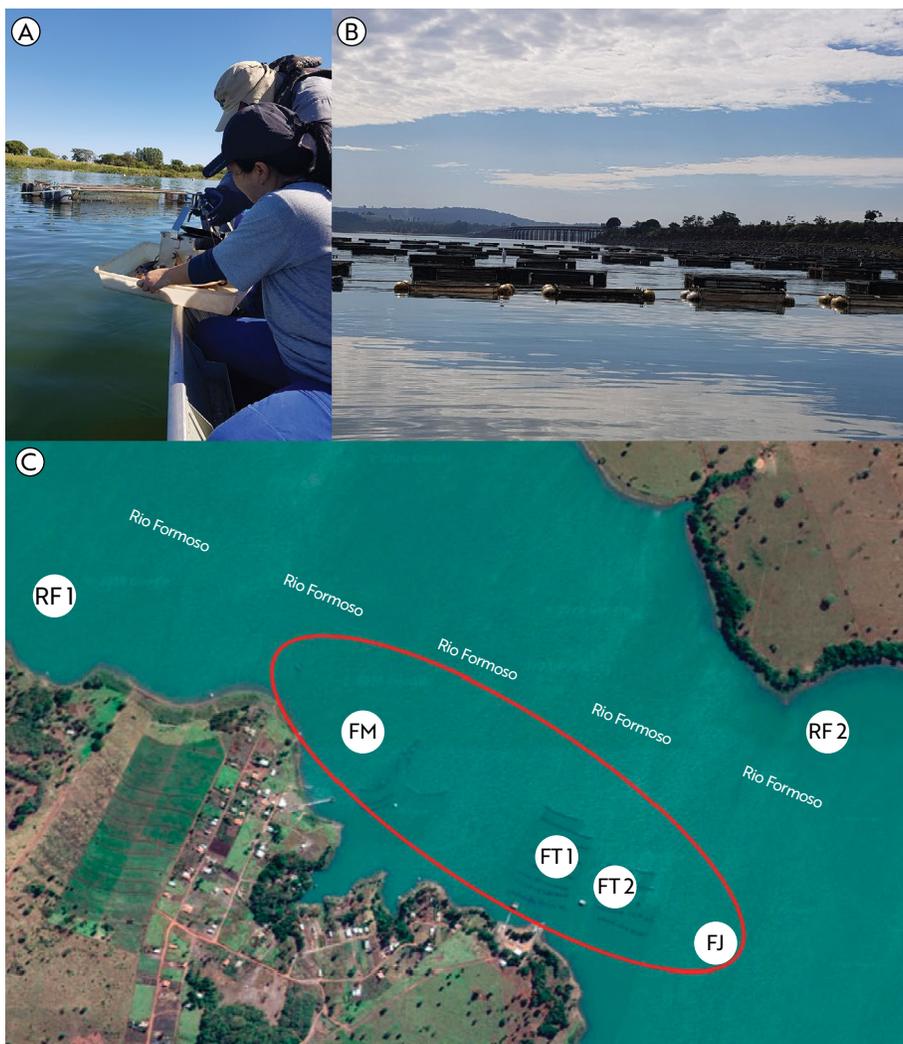
Apesar da eficácia dos coletores de substrato artificial no monitoramento desse sistema de produção, é necessário aumentar a área de estudo e incluir pisciculturas com maior amplitude de qualidade de água para que a ferramenta do biomonitoramento seja avaliada com segurança na aquicultura de viveiros escavados.

O desenvolvimento de ferramentas de monitoramento efetivas depende de encontrar métricas que sejam capazes de detectar os impactos ambientais mais importantes (Ávila et al., 2018), embora a maioria das pesquisas ainda seja voltada a estudar os impactos sobre ambientes naturais. Entretanto, na prática da aquicultura, tanto em tanques escavados quanto em tanques-rede, além do objetivo de estudar o impacto da produção aquícola sobre o ambiente natural, o produtor e a sociedade querem também conhecer os impactos da qualidade da água e de todo o ambiente aquícola sobre a atividade produtiva. E, muitas das vezes, o ambiente já não é natural, ou seja, os tanques escavados, por exemplo, são ambientes artificialmente criados pelo produtor para sua atividade produtiva.

É preciso, então, desenvolver ferramentas adequadas tanto na execução de pesquisas como, depois, para uso prático na avaliação da qualidade da água nos ambientes de produção aquícola. Nesse sentido, do ponto de vista quantitativo, o desenvolvimento de métricas e de índices baseados em bioindicadores tem sido uma preocupação da pesquisa na Embrapa Meio Ambiente. Como fruto desses esforços, já foram alcançados alguns resultados, como no estudo de tamanho de amostras (Luiz et al., 2018), o uso de métricas para análise de dados (Silva et al., 2016; 2018), a aplicação e avaliação de um índice qualitativo (BMWP) já consagrado em aplicações biológicas (Dias et al., 2018) e o desenvolvimento inicial de um índice de qualidade de água para piscicultura (IQAp) com base em dados coletados a campo (Silva et al., 2018).

## O BIOMONITORAMENTO NA AQUICULTURA: TANQUES-REDE

Nos reservatórios de Ilha Solteira (SP/MS) e Chavantes (SP/PR), foram avaliadas seis áreas com distintas infraestruturas de produção de tilápia, tamanho do empreendimento e manejo empregado. As metodologias seguiram de acordo com as características pertinentes aos diferentes sistemas, envolvendo, respectivamente, e coletas de sedimento de fundo com pegadores do tipo “dragas” e em áreas de produção (abaixo dos tanque-rede), além de locais considerados referência, ou seja, fora da área de influência das pisciculturas (Figura 12.3).



Fotos: Mariana S. G. M. Silva

**Figura 12.3.** (A) Coleta de sedimento no reservatório de Chavantes, utilizando a draga de Ekman-Birge. (B) – Tanques-rede dispostos no reservatório de Chavantes. (C) Pontos de coleta no reservatório de Ilha Solteira.

Os resultados obtidos em reservatórios indicaram que o cultivo de tilápias promove uma alteração na composição e na estrutura da comunidade de macroinvertebrados bentônicos nas áreas de produção, e o tamanho da propriedade não foi o fator determinante para tal alteração.

Considerando as limitações de resolução taxonômica abordada anteriormente (uso de níveis mais gerais, p. ex., famílias de macroinvertebrados), abordagens de análise de impacto da piscicultura em áreas de reservatórios que incluam uma amostragem de maiores dimensões espaciais, incluindo bacias hidrográficas de diferentes reservatórios, e também na produção de tanques-rede (p. ex., grandes produtores) poderiam apresentar resultados mais indicativos da influência do cultivo da tilápia-do-nilo nos rios brasileiros. Acrescentando as abordagens de análises múltiplas e funcionais, a agregação de informação da paisagem não menos importantes, como a composição do uso da terra e os tipos de vegetação nativa, poderiam somar informações para a gestão dos parques aquícolas. Isso é justificado pelo fato de as variáveis da paisagem, em especial as composições dos diferentes usos da terra nas bacias hidrográficas, terem desempenhado um importante papel na conservação dos recursos hídricos dos parques aquícolas. Assim, com o desenvolvimento de pesquisas interdisciplinares voltadas ao contexto de ecologia aquática aplicada, o uso de comunidades de macroinvertebrados indicadores poderá contribuir com maior acurácia na sustentabilidade da piscicultura nos reservatórios do país.

## UTILIZAÇÃO DE MICROCRUSTÁCEOS NA AVALIAÇÃO DA TOXICIDADE DE LODOS COM POTENCIAL USO AGRÍCOLA

Os microcrustáceos são componentes importantes das cadeias alimentares no ecossistema aquático. É relevante, portanto, determinar a sensibilidade desses organismos a contaminantes ambientais e, paralelamente, selecionar espécies sensíveis como organismos-teste para auxiliar no estabelecimento de níveis permissíveis nos corpos de água (Karpowicz et al., 2020).

O lodo proveniente de estações de tratamento de águas residuárias pode fornecer diversos nutrientes essenciais para plantas, especialmente o nitrogênio. Portanto, uma das principais alternativas para a disposição final desses resíduos é sua utilização na agricultura como fertilizante (Lobo et al., 2013).

Metais e agentes tóxicos de natureza orgânica, como fenóis, benzenos, antracenos, alquilbenzenos lineares sulfonados e outros, podem constituir fontes de contaminação dos lodos, dependendo da natureza (Paraíba; Saito, 2005; Babel; Dacera, 2006). Assim, as comunidades aquáticas podem ser diretamente impactadas pela contaminação de recursos hídricos a partir de práticas agrícolas que utilizem lodos como fertilizante (Shefali et al., 2021).

Nesse cenário, realizou-se estudo em que se utilizou lodo proveniente de duas estações de tratamento de esgoto: estação de Franca (SP), que recebe esgotos estritamente domésticos, e estação de Barueri (SP), que, além de esgotos domésticos, recebe esgotos industriais (Jonsson; Maia, 2007). O estudo teve como objetivo avaliar o efeito adverso, em curto (72 horas) e longo prazo (14 dias), do lodo dessas duas estações de tratamento sobre o microcrustáceo *Daphnia similis*. A metodologia para avaliação da toxicidade em longo prazo de exposição está descrita abaixo.

---

Foram utilizados organismos jovens, com idade inferior a 24 horas, do microcrustáceo *Daphnia similis* cultivados em água reconstituída, preparada segundo o método de Hosokawa et al. (1991) e enriquecida com micronutrientes (Elenedt; Bias, 1990).

As culturas foram mantidas sob temperatura de 20 °C + 2 °C, luminosidade de aproximadamente 1.000 lux e em água com as seguintes características físico-químicas: pH = 7,8; dureza total = 111 mg L<sup>-1</sup> CaCO<sub>3</sub> e condutividade = 0,38 mS cm<sup>-1</sup>.

Em recipientes de vidro medindo cerca de 14,5 cm de altura e 7,5 cm de diâmetro, foram adicionadas 1 ou 5 g de lodo (peso úmido) e 500 mL de água reconstituída. Efetuou-se adição vagarosamente, de modo a evitar ao máximo a suspensão do material-teste na coluna de água. As concentrações de 2 e 10 g L<sup>-1</sup> resultantes foram preparadas em réplicas de oito recipientes. Recipientes como controle continham água de diluição isenta de material-teste. Cada recipiente recebeu 12 organismos que foram expostos às condições de temperatura e luminosidade descritas anteriormente. Os recipientes foram aerados pela introdução de mangueira com pedra porosa acoplada em minicompressor.

O estudo teve duração de 14 dias, sendo a renovação do conteúdo dos recipientes realizada três vezes por semana. Para cada renovação, registrou-se o número de organismos que apresentavam mobilidade em cada recipiente e calculou-se a porcentagem de imobilidade.

---

Com o objetivo de verificar a toxicidade dos compostos orgânicos presentes no lodo com maior toxicidade (Barueri), foram realizados testes de toxicidade com curto prazo de exposição com o extrato orgânico e com o resíduo da extração, cuja metodologia está descrita a seguir.

Pesaram-se 12 g de lodo (peso úmido), o qual foi extraído com duas porções de 20 mL de acetona, sob agitação durante cinco minutos. A fase orgânica foi transferida para um balão de fundo redondo e totalmente evaporada a 35 °C em um rotaevaporador. O extrato seco resultante foi, então, ressuspensão em 0,3 mL de acetona. O resíduo remanescente da extração foi separado.

Avaliaram-se cinco tratamentos em um volume total de 500 mL de meio, descritos a seguir: controle ( $T_1$ ) – água reconstituída; controle + acetona ( $T_2$ ) – água reconstituída + 50 µL de acetona; extrato orgânico ( $T_3$ ) – água reconstituída + 50 µL de extrato orgânico; resíduo ( $T_4$ ) – água reconstituída + 2 g do resíduo da extração; e lodo ( $T_5$ ) – água reconstituída + 2 g de lodo (peso úmido).

Doze organismos-teste foram colocados em cada recipiente. O experimento foi realizado em réplicas de no mínimo cinco recipientes para cada tratamento.

Os organismos foram expostos aos diferentes tratamentos durante 72 horas à temperatura de 20 °C ± 2 °C e luminosidade de aproximadamente 1000 lux. Após esse período, avaliou-se a taxa de imobilidade dos organismos por recipiente.

A Figura 12.4 apresenta os resultados de toxicidade dos lodos de Franca e Barueri para o organismo-teste, em que a percentagem de imobilidade se manteve entre 3,1% e 21,8% durante todo o ensaio. No fim do período de exposição, houve redução quase total (de 2% a 8%) da população de organismos móveis para todos os tratamentos com os dois lodos.

Os dados sugerem que o lodo de Franca (Figura 12.4A) apresentou menor toxicidade em menor período de exposição, comparativamente ao lodo de Barueri. No terceiro dia de exposição, a imobilidade dos organismos expostos ao lodo de Franca foi menor que 20%, ao passo que os tratamentos com o lodo de Barueri (Figura 12.4B) afetaram aproximadamente 80% dos organismos para o mesmo período. Essa observação poderia estar associada a maiores valores de concentração de alguns metais no lodo de Barueri, que recebe esgotos industriais e domésticos). Foram determinadas concentrações de Ni, Cu, Cd, Pb e Zn de 33,9; 153; 2,6; 72,6 e 744 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, no lodo de Franca, ao passo que no de Barueri as concentrações desses mesmos metais foram superiores (289,3; 738; 8,8; 160,5 e 1.765 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente).

Apesar da ausência de toxicidade apresentada pelo lodo de Franca nos primeiros dias de exposição, observou-se aumento gradual do efeito em função do tempo, para ambas as concentrações testadas. Assim, observaram-se 91,7% e 96,9% de imobilidade no fim do período de exposição para os tratamentos com 2 e 10 g L<sup>-1</sup> de lodo, respectivamente. Altos percentuais de imobilidade também foram observados nos tratamentos com o lodo de Barueri. Entretanto, esses efeitos se manifestam em um período de exposição inferior comparativamente aos do lodo de Franca.

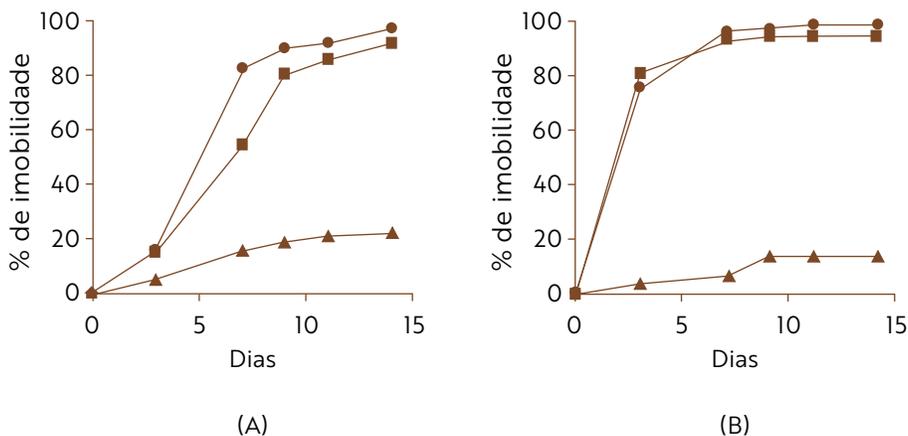


Figura 12.4. Toxicidade a longo prazo do lodo de Franca (A) e Barueri (B) para *D. similis*. Controle (▲); 2 g L<sup>-1</sup> (■); 10 g L<sup>-1</sup> (●). Cada ponto corresponde à média de observações em oito recipientes.

Nos estudos de curto prazo de exposição (Tabela 12.1), os dados demonstram que a presença de componentes orgânicos solúveis em acetona deve ser, em grande parte, responsável pela toxicidade do material-teste. As porcentagens de imobilidade no tratamento com extrato orgânico e no controle adicionado de acetona foram 76,67% e 6,67%, respectivamente. A alta toxicidade do resíduo remanescente da extração sugere a presença de agentes tóxicos que podem ser de natureza orgânica (não extraídos pela acetona) ou inorgânica. A porcentagem de imóveis foi significativamente maior no tratamento T4 (resíduo) quando comparado ao T5 (lodo), indicando menor toxicidade deste último em relação ao primeiro. Provavelmente, a retirada de material orgânico pelo solvente extrator do lodo tenha contribuído para tornar biodisponíveis compostos tóxicos remanescentes no resíduo.

Tabela 12.1. Imobilidade de *D. similis* nos diferentes tratamentos e resultados do teste de Wald (Wald, 1943)

Tratamento	N <sup>a</sup>	Imobilidade (%)	Erro Padrão	Valores p <sup>b</sup>				
				T1	T2	T3	T4	T5
Controle (T1)	60	5,00	2,81	-	0,6967	<0,001	<0,001	<0,001
Controle + acetona (T2)	60	6,67	3,22	-	-	<0,001	<0,001	<0,001
Extrato orgânico (T3)	60	76,67	5,46	-	-	-	<0,001	0,6029
Resíduo (T4)	60	100,0	0,00	-	-	-	-	<0,001
Lodo (T5)	96	80,21	4,07	-	-	-	-	-

<sup>a</sup> Número total inicial de indivíduos em cinco recipientes nos tratamentos 1-4 e oito recipientes no tratamento 5 (T5).

<sup>b</sup> Probabilidade de erro tipo I associada ao teste qui-quadrado de Wald para contrastes entre pares de tratamentos.

De acordo com os dados apresentados, concluiu-se que, em decorrência da aplicação de lodo de esgoto proveniente das estações de tratamento de Franca e Barueri, existe algum risco de ocorrência de efeitos adversos para a biota aquática. O risco estaria relacionado à aplicação do lodo em regiões agrícolas próximo a compartimentos aquáticos, sendo que os efeitos se manifestam, em curto ou longo prazo, em organismos zooplancônicos e, conseqüentemente, em outros organismos da cadeia alimentar. Esse fenômeno estaria associado ao transporte do lodo para os referidos compartimentos, assim como de seus constituintes orgânicos ou inorgânicos com potencial tóxico. Concluiu-se, ainda, que os efeitos tóxicos do lodo de Barueri não devem ser atribuídos somente à presença de metais já constatados neste material, mas, também, à presença de compostos orgânicos extraídos pela acetona e que podem ter propriedades cumulativas.

## PEIXES COMO BIOINDICADORES

De modo geral, bioindicadores são organismos vivos ou parte de um organismo ou uma comunidade de organismos de natureza diversa (vegetais ou animais) que proporcionam informações sobre a qualidade do ambiente e os efeitos de contaminação por vários poluentes (Adams, 2002; Chovanec et al., 2003). Nesse contexto, os peixes desempenham papel fundamental como bioindicadores de contaminação ambiental e na gestão dos recursos hídricos, proporcionando uma visão integrada do estado do ambiente aquático (Noss, 1990; Plessl et al., 2017).

Pela importância dos peixes como fonte de proteína animal para alimentação humana, a possibilidade de contaminação alimentar já se destaca como um dos mais importantes bioindicadores. Além disso, segundo Chovanec et al. (2003), os peixes são amplamente utilizados para descrever as características naturais dos sistemas aquáticos e, também, para avaliar as alterações do habitat e, portanto, apresenta algumas vantagens, tais como:

- Apresenta vasta tradição de pesquisas ecológicas, fisiológicas e ecotoxicológicas que geraram conhecimento avançado sobre várias espécies de peixes;
- Muitas variáveis ambientais abióticas em diferentes espaço-temporais estão ligadas às complexas exigências de habitat de determinadas espécies e a suas fases ontogenéticas;
- Haja vista o tamanho do peixe e de seus órgãos, muitos procedimentos analíticos podem ser avaliados, tais como abordagens hematológicas, histopatológicas e de biocumulação;
- Em função da longevidade dos peixes, certos efeitos indicativos, como os processos de acumulação pode ser observados;

- Como consumidores primários e secundários a diferentes níveis, os peixes refletem as condições tróficas dos sistemas aquáticos;
- A pesca extrativista e a pesca esportiva têm uma longa história, na qual os peixes desempenham um papel importante como indicadores da qualidade da água etc.

Além disso, são possíveis a adaptação e a manutenção em condições laboratoriais dos peixes capturados em ambientes naturais, além da facilidade de aquisição de algumas espécies produzidas na aquicultura comercial ou ornamental, que potencializa o uso do peixe como modelo bioindicador em vários estudos.

Em função da importância dos estudos de toxicidade de diversos compostos químicos, tais como medicamentos veterinários e agrotóxicos e o consequente impacto ambiental, conduziram-se alguns experimentos pela equipe da Embrapa Meio Ambiente com foco nas fases iniciais de peixes como bioindicadores e modelo biológico.

A intensificação da aquicultura proporcionou aumento na utilização de antibióticos, cujas principais preocupações para a saúde pública estão relacionadas ao desenvolvimento e à propagação de bactérias resistentes aos antibióticos e genes de resistência, além da ocorrência de resíduos de antibióticos em produtos de aquicultura (Organização Mundial da Saúde, 2006). Assim, os estudos ecotoxicológicos, a análise de risco e as recomendações sobre o uso responsável de antibióticos são essenciais para melhorar a biossegurança da aquicultura, diminuindo o impacto ambiental e problemas relacionados à saúde pública.

Mattioli et al. (2020) buscaram determinar a concentração letal (CL<sub>50-96h</sub>), a concentração efetiva (CE<sub>50-96h</sub>), o risco ecotoxicológico e o desenvolvimento de larvas de tilápia-do-nilo *Oreochromis niloticus* submetidas à exposição ao florfenicol (FF) e concluíram que as concentrações de FF avaliadas apresentaram efeitos tóxicos agudos para as larvas de tilápia-do-nilo, influenciando nas taxas de sobrevivência. Além disso, a exposição de FF em períodos curtos (96 horas) pode proporcionar diminuição significativa no peso e no tamanho das larvas. Contudo, de acordo com a avaliação de risco, o FF pode ser classificado como de baixa toxicidade para as larvas de tilápia e de baixo risco para o ambiente, justificando sua utilização na aquicultura.

Por outro lado, Takeshita et al. (2019; 2020) avaliaram a concentração letal (CL<sub>50-96h</sub>) de oxitetraciclina (OTC) para as larvas de tilápia-do-nilo, o efeito das dosagens subletais na mortalidade das larvas de tilápia em condições pós-estresse e o coeficiente de risco ambiental. Os autores concluíram que os efeitos tóxicos da OTC influenciaram o desenvolvimento das larvas de tilápia. A exposição ao ar é um fator estressante e, em conjunto com a exposição a doses subletais de OTC, pode incrementar seus efeitos tóxicos. Além disso, com base no coeficiente de risco, a OTC apresenta elevado risco para as larvas de tilápia quando exposta à concentração terapêutica.

As regiões produtoras de grãos geralmente estimulam a implementação de atividades pecuárias e aquícolas em áreas circunvizinhas, em função da facilidade de logística e transporte desses alimentos que diminuem os custos da produção animal. Considerando a aplicação da atrazina nas grandes culturas de grãos, é presumível que o peixe da aquicultura e do ambiente natural possam ser expostos à atrazina originária da agricultura intensiva. Assim, destaca-se o estudo de Chiste et al. (2021), que buscaram determinar concentração letal (CL<sub>50-96h</sub>), avaliação de risco, desenvolvimento e mortalidade de larvas de tilápia-do-nilo submetidas a atrazina em condições de pós-estresse (exposição ao ar). Como principais conclusões do estudo, evidenciou-se que o aumento das concentrações de atrazina utilizadas no teste de concentração letal diminui o desenvolvimento das larvas de tilápia-do-nilo. Os peixes submetidos a estresse (exposição ao ar) e expostos a doses subletais de atrazina apresentaram mortalidade significativa, indicando que estresse potencializa o efeito tóxico da atrazina para as larvas de tilápia-do-nilo. Por outro lado, com base na avaliação do risco, a atrazina pode ser classificada como herbicida com baixa toxicidade para as larvas de tilápia e baixo risco toxicológico.

Nos estágios iniciais de desenvolvimento e, principalmente após a eclosão, os peixes apresentam alta sensibilidade às variações ambientais, que são características importantes como bioindicadores ambientais. As larvas de tilápia-do-nilo apresentam características interessantes, pois são de fácil aquisição e baixo custo, adaptam-se às condições laboratoriais, o que facilita sua adaptação e manutenção, apresentam certa rusticidade, principalmente quando comparada a outras espécies nativas, e alimentam-se de dietas artificiais. Além disso, dado o tamanho reduzido, permitem o uso de estrutura laboratorial compacta e simples.

## O GÊNERO *CHIRONOMUS* (CHIRONOMIDAE: DIPTERA) EM TESTES ECOTOXICOLÓGICOS

As águas superficiais e subterrâneas, segundo a United States Environmental Protection Agency (Usepa – Estados Unidos, 1989), têm sido amplamente deterioradas por diversas situações, como adição de produtos químicos, contaminação biológica, despejos industriais e domésticos ou carreamento superficial dos solos urbanos e agrícolas (Dornfeld, 2006; Cetesb, 2008), o que, conseqüentemente, ocasiona o desequilíbrio dos ecossistemas, principalmente os aquáticos. Esses ecossistemas apresentam uma série de mecanismos físicos, químicos e biológicos para a assimilação de substâncias tóxicas que previnem danos à biota. No entanto, quando estas chegam a níveis acima da capacidade assimilativa do corpo receptor, podem afetar a sobrevivência, o crescimento, a reprodução ou o comportamento dos organismos ali presentes.

Essas alterações fisiológicas em organismos são alvo de pesquisa na ecotoxicologia, a qual se destina à observação de respostas biológicas como consequência dos efeitos dos contaminantes sobre os seres vivos e ecossistemas (Newmann; Unger, 2003), pois, quando misturadas em meio aquoso, as substâncias químicas podem apresentar características e efeitos diferentes sobre os organismos, e uma mesma substância química pode ter efeitos diversos em organismos diferentes (Jager et al., 2007). Assim, a ecotoxicologia alerta para o risco de substâncias químicas, sugerindo a aplicação de medidas preventivas antes que ocorram graves danos aos ecossistemas naturais.

Nos ecossistemas aquáticos, a atuação do sedimento como depositório e eventual fonte de compostos químicos naturais aumentou o interesse no desenvolvimento de metodologias, como ensaios padronizados com organismos associados ao sedimento (Adams; Rowland, 2003). Uma série de organismos (como anfípodes, larvas de insetos, poliquetas, oligoquetas, cladóceros) foram utilizados em ensaios padronizados para avaliação ecotoxicológica de contaminantes associados a sedimentos (Estados Unidos, 2000), auxiliando na avaliação ambiental e em análises químicas que apenas identificam e quantificam as substâncias presentes no ambiente. Outras espécies, como as da família Chironomidae (Insecta, Diptera), também têm sido utilizadas como organismos-teste em ensaios ecotoxicológicos com sedimentos, pois são boas indicadoras da qualidade ambiental e estão presentes abundantemente na fauna bentônica, em ambientes aquáticos continentais e marinhos (Warwick, 1990). No Brasil, a espécie nativa *Chironomus sancticaroli* vem sendo cultivada em laboratório e utilizada em ensaios ecotoxicológicos com sedimentos. Nesses ensaios, são observados efeitos na sobrevivência, no crescimento, na emergência, na reprodução e na deformidade das peças bucais, como reflexo da presença de substâncias químicas potencialmente tóxicas ou de compostos bioacumulados.

Os efeitos biológicos observados durante ou após os ensaios são caracterizados como agudos ou crônicos. O efeito agudo manifesta-se após curto período de exposição, de maneira rápida e severa, causando a letalidade ou a imobilidade dos organismos expostos, geralmente, após o período de 24 a 96 horas. Contrariamente ao efeito agudo, o crônico é observado após um período longo de exposição ou por um longo período do ciclo de vida do organismo, geralmente, 10% ou mais (Adams; Rowland, 2003), podendo afetar uma ou mais funções biológicas, como a reprodução, o metabolismo, o crescimento, o desenvolvimento dos ovos, mutações, deformidades morfológicas e mesmo a morte dos organismos após a exposição por longos períodos (Cooney, 1995).

Organismos-teste, como os quironomídeos, têm sido utilizados em ensaios agudos e crônicos para a observação de efeitos no ciclo de vida e sobrevivência da geração F1 (Giesy; Hoke, 1989) na sobrevivência dos organismos expostos, no crescimento, na fecundidade e fertilidade, no desenvolvimento de deformidade do mento e de peças bucais, na bioacumulação de compostos orgânicos e inorgânicos, em estudos com

biomarcadores, com nanopartículas, entre outros. Existem protocolos internacionais para a realização de ensaios ecotoxicológicos com amostras de sedimento integral ou fortificado utilizando larvas de *Chironomus tentans*, *Chironomus riparius* e *Chironomus* sp., segundo a Tabela 12.2.

**Tabela 12.2.** Protocolos de ensaios ecotoxicológicos utilizando o gênero *Chironomus*

Instituição	Protocolo	Descrição	Ano
Usepa	EPA 600/R-99/064	Methods for Measuring the Toxicity and Bioaccumulation of Sediment-associated Contaminants with Freshwater Invertebrates	2000
ASTM	E 1706-20	Standard Test Method for Measuring the Toxicity of Sediment-Associated Contaminants with Freshwater Invertebrates	2020
Environment Canada	EPS1/RM/32	Biological Test Method: Test for Survival and Growth in Sediment Using Larvae of Freshwater Midges ( <i>Chironomus tentans</i> or <i>Chironomus riparius</i> )	1997
OECD	235	<i>Chironomus</i> sp., Acute Immobilisation Test	2011
	233	Sediment-Water Chironomid Life-Cycle Toxicity Test Using Spiked Water or Spiked Sediment	2010
	219	Sediment-Water Chironomid Toxicity Using Spiked Water	2004
	218	Sediment-Water Chironomid Toxicity Using Spiked Sediment	2004

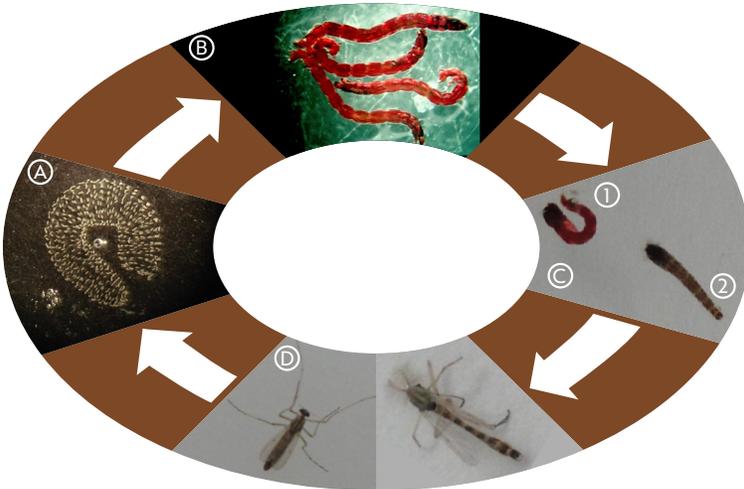
O gênero *Chironomus* representa uma porção significativa da biomassa bêntica, desempenhando um importante papel na cadeia alimentar e na ciclagem de resíduos encontrados no sedimento pelo processo de bioturbação, além de ser facilmente cultivado em laboratório (Giesy; Hoke, 1989; Estados Unidos, 2000). Todo o ciclo larval de quironomídeos ocorre em ambiente aquático e em contato direto com o sedimento, podendo permanecer enterrado a apenas poucos centímetros. O ciclo de vida desses organismos pode ser dividido em quatro fases: ovo, estágio larval (constituído por quatro instares), pupa e adulto. Com relação à alimentação desse gênero, observaram-se diferentes comportamentos alimentares, desde a filtração de partículas menores presentes na coluna d'água à predação direta de pequenos organismos (Armitage et al., 1995). Os quironomídeos apresentam, ainda, ampla distribuição geográfica e resistência às condições físicas e químicas extremas, como variações de pH, temperatura, oxigênio dissolvido, velocidade de correntes, salinidade e profundidade.

De acordo com Zagatto e Bertolotti (2006), alterações das variáveis biológicas em condições de cultivo, da habilidade do técnico na realização dos ensaios, das condições abióticas e da sensibilidade do lote dos organismos podem influenciar os resultados observados nos bioensaios. Ainda de acordo com os mesmos autores, sugere-se monitoramento da taxa de reprodução, observação da presença de formas resistentes e uso

de substâncias de referência. Além disso, é possível incluir fecundidade, fertilidade, taxa de eclosão, deformidades morfológicas, entre outras. Além da identificação e monitoramento das variáveis que possam refletir na saúde dos organismos em condições de cultivo, torna-se necessário o estabelecimento de critérios de aceitabilidade para tais condições, garantindo a utilização de organismos saudáveis para o início de novas culturas e para a realização de ensaios ecotoxicológicos. Diferentemente dos efeitos observados nos organismos submetidos ao controle em ensaios ecotoxicológicos, cujos critérios de aceitabilidade já estão bem estabelecidos em normas nacionais e protocolos internacionais, as variáveis biológicas identificadas em organismos cultivados são apenas descritas e não quantificadas, principalmente para o gênero *Chironomus*.

## A ESPÉCIE *CHIRONOMUS SANCTICAROLI*

A espécie *Chironomus sancticaroli*, pertencente à Família Chironomidae, tem grande relevância ecológica, por ser uma espécie nativa encontrada no estado de São Paulo. Descrita por Strixino e Strixino em 1980, foi considerada por Speis e Reiss (1996) sinônimo júnior de *Chironomus xanthus* Rempel 1939 (Correia, 2004). O comportamento reprodutivo dessa espécie foi descrito por Strixino (1980) e, assim como os demais quironomídeos, essa espécie apresenta quatro fases de desenvolvimento em seu ciclo de vida: ovo, estágio larval (constituído por quatro instares), pupa e adulto, conforme apresentado na Figura 12.5.



**Figura 12.5.** Ciclo de vida do gênero *Chironomus* sp. (A) Ovos. (B) Larvas. (C) Pupa (1 – recente empupamento e 2 – pupa madura). (D) Adultos (fêmea à esquerda e macho à direita).

O período de desenvolvimento de todo o ciclo de vida varia em função da temperatura e da espécie, sendo de 21 dias a 23 °C para *C. dilutus* (American Society for Testing Material, 2005); de 28 a 30 dias para temperatura entre 15 e 19,5 °C; e de 15 a 17 dias em temperaturas compreendidas entre 21 e 24 °C, para o desenvolvimento de *C. sancticaroli* (Strixino; Strixino, 1985). Estudos iniciais sobre a biologia da espécie *C. sancticaroli* foram conduzidos por Strixino (1973) e Strixino e Strixino (1985) para verificação da fecundidade, além da descrição inicial de metodologias de cultivo em laboratório e ciclo de vida da espécie. Nesses estudos, determinaram-se percentuais de sobrevivência das larvas, fecundidade, fertilidade e taxa de eclosão, observando influências da temperatura, qualidade e quantidade de alimento fornecido aos organismos nas variáveis analisadas. Já Fonseca (1997) estabeleceu as condições de cultivo para *C. sancticaroli*, as quais são referenciadas em diversos estudos no Brasil.

## AÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA: CAPACITAÇÃO DE AGRICULTORES, SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA E ACORDO DE COOPERAÇÃO COM MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL

### Origem das ações de transferência sobre a temática dos insetos aquáticos - experiências brasileiras e seus resultados

No Brasil, ações de divulgação da ciência são fortemente estimuladas pelo Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação (MCTIC), por meio da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia (SNCT), que conta com edições anuais desde 2004, ano de sua implantação. Há melhoria na compreensão sobre ciência e tecnologia por parte dos estudantes participantes (Sousa et al., 2019), justificando o estímulo para que mais profissionais também se dediquem a essas atividades, ampliando seu leque de atuação para além de pesquisa e ensino.

Atividades de transferência de tecnologia/conhecimento na área do biomonitoramento aquático utilizando insetos aquáticos datam do fim do século XX ao início do século XXI. Alguns países criaram campanhas nacionais para envolver a população no cuidado do meio ambiente, conferindo treinamento teórico e prático aos participantes (Taccogna; Munro, 1995; Gullickson; Liukkonen, 2002; River Health Programme, 2007; Global Water Watch, 2014).

No Brasil, há diversos relatos de capacitação de agricultores em temas diretamente relacionados à produção de bens de consumo agrícola (Vieltes et al., 2012; Bertolo et al., 2016; Silva et al., 2019), porém, poucos são os exemplos brasileiros de capacitação

voltada à sustentabilidade ambiental (Santos; Barros 2013; Riedner et al., 2018) e, mais especificamente, ao biomonitoramento aquático.

Neste último caso, cita-se a iniciativa pioneira da Itaipu Binacional em parceria com a Fiocruz, o Programa Cultivando Água Boa, que envolveu, principalmente, estudantes de ensino básico de municípios do entorno do reservatório de Itaipu (PR) (<https://www.itaipu.gov.br/meioambiente/cultivando-agua-boa>).

Em seguida, outras iniciativas para capacitar a população em qualidade da água surgiram em outras regiões do país, ressaltando-se aquela realizada no Nordeste, por equipe da Embrapa em parceria com universidades, a qual resultou em várias ações (Figueirêdo et al., 2008; Girão; Ribeiro, 2009; Siste et al., 2011).

Na Embrapa Meio Ambiente, foram desenvolvidas três experiências relacionadas ao monitoramento participativo/capacitação da população, relatadas a seguir. Ressalta-se que a primeira delas, no Norte de Minas Gerais, foi uma atividade inicialmente desenvolvida na Embrapa Cerrados, porém, com a transferência da pesquisadora Kathia Sonoda para a Embrapa Meio Ambiente, foi concluída nesta última.

## Alto Rio Pardo (MG)

A proposta de capacitação de agricultores familiares e técnicos agrícolas do norte de Minas Gerais foi uma demanda do projeto Ações de uso e manejo da biodiversidade de sistemas agrícolas e extrativistas visando a segurança alimentar e geração de renda de agricultores familiares do Território do Alto Rio Pardo. Projeto Rio Pardo Fase II, inicialmente coordenado por pesquisadores da Embrapa Cerrados. Mais recentemente, parte da equipe desse projeto foi incorporada ao projeto BemDiverso ([www.bemdiverso.org.br](http://www.bemdiverso.org.br)), sob responsabilidade da Embrapa Hortaliças.

A comunidade Água Boa 2 ocupa a microbacia do rio homônimo, estando situada no município de Rio Pardo de Minas (MG). Em 2005, contava com 96 famílias em uma área de 5,533,80 ha (Correia, 2005). Essa microbacia está localizada entre as coordenadas 15°32'11,8"S e 42°27'37,3"W, em regime hidroclimático predominantemente semiárido (média anual de precipitação de 890 mm/ano) (Machado et al., 2008).

Inicialmente, a microbacia foi ocupada às margens dos córregos, e a fonte de renda das famílias, desde o princípio, baseia-se em subsistência a partir da coleta de fibras e frutos, que são vendidos na feira municipal ou processados na cooperativa da própria comunidade (Correia et al., 2008; Vilela et al., 2009).

A seleção dos locais de coleta foi realizada de maneira participativa entre agricultores e pesquisadores da Embrapa para geração de dados científicos. Em estudo preliminar (não publicado), observou-se que, em relação aos táxons indicadores, representantes das ordens Ephemeroptera, Plecoptera e Trichoptera, reconhecidas como indicadoras de boa qualidade ambiental (Vuataz et al., 2013; Monteles et al., 2021),

estiveram discretamente presentes no atual estudo. Este fato pode ter sido originado por vários motivos: 1) desaparecimento de indivíduos devido ao impacto decorrente do desmatamento e da retilinização do canal dos córregos (prática comum entre os agricultores locais); 2) resiliência afetada; 3) extinção das famílias em outros locais, influenciando a capacidade de dispersão e a consequente recolonização dos córregos alterados (Galic et al., 2013); e 4) escassez de habitats compatíveis com os requerimentos para sobrevivência dessas famílias, entre outros fatores.

De posse desse conhecimento prévio, que serviu como embasamento para a capacitação dos agricultores, os pesquisadores despenderam um fim de semana na região, proporcionando palestras e treinamento em monitoramento biológico das águas. Essa interação foi muito proveitosa, pois permitiu a troca de conhecimento e de experiências, com os agricultores expondo seus costumes de vida e cuidados com a água e solo.

Ao final do treinamento, os participantes constataram que as condições ambientais dos córregos não se apresentavam pristinas, e essa informação foi retransmitida ao restante da comunidade (que não participou da capacitação) no fim da tarde de domingo. Os ouvintes ficaram surpresos ao saber que os córregos não estavam em boas condições, e novas formas de manejo foram adotadas, sem a supressão total da vegetação ripária, com recuperação desta onde possível.

## **Insetos aquáticos na Semana Nacional de Ciência e Tecnologia 2018**

Com base no tema da SNCT de 2018 – “O papel da mulher na ciência” –, a coordenadora do projeto viajou por 40 municípios de sete estados brasileiros, incluindo o Distrito Federal, com o objetivo de transmitir aos estudantes as alterações proporcionadas pelo estudo na vida das pessoas. Intitulada “A ciência dos insetos aquáticos”, a palestra foi apresentada 86 vezes, alcançando um público formado por crianças, jovens e adultos e totalizando mais de 6 mil ouvintes. Essas ações foram associadas ao programa Embrapa e Escola de todas as unidades parceiras (Cerrados, Milho e Sorgo, Tabuleiros Costeiros, Soja), cujo apoio foi fundamental para o sucesso do projeto.

Além desse apoio, o projeto contou com valiosas parcerias firmadas com a Diretoria de Ensino Regional de Mogi Mirim (SP) e com diversas Secretarias Municipais de Meio Ambiente e de Educação.

As produções de dois livros infanto-juvenis [disponíveis no site Contando Ciência na Web: Mistério no mundo aquático submerso (Sonoda; Fonseca, 2019), e Quem mexeu no meu córrego? (Sonoda et al., 2019)] e de um baralho didático sobre insetos aquáticos foram produtos deste projeto, os quais foram depositados nas escolas como prêmio à capacidade de os alunos trabalharem em grupo ao responder a perguntas sobre o conteúdo aprendido após as palestras. Uma publicação detalhada referente a esse projeto pode ser encontrada em Sonoda et al. (2021).

## Acordo com Ministério Público Federal

O Ministério Público Federal (MPF) de São Paulo tomou conhecimento do projeto de divulgação da ciência supramencionado e contactou a coordenadora deste. Por meio do projeto Conexão Água, firmou-se um acordo de cooperação técnica entre 2019 e 2020, em que a Embrapa Meio Ambiente atuou como parceira técnico-científica. Entre as atividades desenvolvidas, destacam-se: 1) fornecimento de embasamento técnico-científico para elaboração da campanha; 2) embasamento técnico-científico para elaboração de um aplicativo para smartphone sobre percepção ambiental por meio de insetos aquáticos (aplicativo Monitorando a Cidade); e 3) palestra para 680 alunos em escola-modelo previamente selecionada pelo MPF, nos moldes executados no projeto da SNCT citado previamente.

Essa experiência foi uma oportunidade ímpar para conhecer mais a fundo as diversas facetas de atuação do MPF e permitir a interação entre esses dois órgãos do governo. Para mais informações sobre a campanha, acesse: <https://conexaoagua.mpf.mp.br/biomonitorando/>.

## Desafios encontrados e meios de resolvê-los

Trabalhar com público não especializado, com cultura, formações pessoais, profissionais, educacionais e interesses diferentes torna-se, muitas vezes, um grande desafio. Integrar visões de mundo, expectativas quanto às atividades propostas e envolvimento pessoal com a iniciativa, constitui um emaranhado de desafios que requerem capacidade de gerenciamento de pessoas/equipe, conhecimento emocional de si e dos comportamentos humanos. O objetivo de alcançar a meta proposta iguala os interesses e permite a superação dos problemas.

Em cada uma das experiências apresentadas, os desafios foram contornados graças à vontade de atuar em prol do bem comum: o respeito ao meio ambiente e a manutenção da qualidade de vida em Alto Rio Pardo; a divulgação de horizontes profissionais diferenciados por meio da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia; a integração do saber e da ação pela parceria com o Ministério Público Federal.

Assim, fins de semana não foram poupados e tornaram-se oportunidades de troca de saberes, aprendizados e atividades com o público-alvo; unidades da Embrapa foram envolvidas de maneira integrada, permitindo a execução de palestras a mais de 6.000 estudantes de ensino básico e médio de todas as faixas etárias, inclusive adultos de sete estados brasileiros; adoção de aplicativos para smartphone e drones permitiram que centenas de jovens realizassem avaliações ambientais do entorno de suas moradias.

Foram apresentadas três experiências que ilustraram diferentes formas de aplicações do conhecimento sobre insetos aquáticos como bioindicadores no cotidiano da população leiga.

Apesar do expressivo papel da SNCT nas ações de transferência de conhecimento, pouco se conhece sobre os impactos sociais nas vidas dos estudantes atendidos, estimando-se que somente 4,9% das atividades receberam acompanhamento a posteriori (Sousa, 2015).

Entretanto, baseando-nos em outros relatos de capacitação, pode-se inferir que há uma ampla gama de benefícios conferidos aos participantes e à população, principalmente em relação à melhoria da saúde, das condições do meio ambiente e da agricultura familiar (Duarte et al., 2010; Sousa et al., 2010).

## TENDÊNCIAS E DESAFIOS

### Mudanças climáticas

O recém-publicado relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) afirma que estamos diante de mudanças drásticas nunca antes vistas, sendo que algumas são consideradas irreversíveis. O aumento na temperatura global já é de 1,5 °C, segundo o IPCC (Allen et al., 2019), e os estudos preveem que esse limite será ultrapassado até 2040. Com esse cenário, diversos estudos científicos têm procurado demonstrar os impactos do aquecimento global sobre a fauna e a flora.

Em um estudo sobre os efeitos do degelo no noroeste do Canadá, Chin et al. (2016) concluíram que os impactos estavam fortemente associados a declínios significativos na abundância na comunidade de macroinvertebrados bentônicos. Além disso, as diferenças nos índices de composição contribuíram para o contraste acentuado entre locais não perturbados e altamente perturbados. Houve, também, forte relação negativa entre a abundância de invertebrados e sólidos totais dissolvidos, indicando que o aumento nos sedimentos foi o principal fator relacionado à mudança biótica.

### Estudos com Mesocosmos

Os estudos ecotoxicológicos realizados em laboratório auxiliam na observação dos efeitos adversos aos organismos expostos com relação à presença de contaminantes na amostra analisada. Embora sejam realizados em condições controladas que garantem a confiabilidade dos resultados obtidos, esse cenário não reflete os possíveis riscos existentes para a biota de determinado ambiente e a relevância ecológica dos efeitos observados em laboratório. Para isso, ensaios de mesocosmos e até micros-

mos ao ar livre ou confinados foram desenvolvidos para responder a uma hipótese específica, por exemplo, avaliar os efeitos de substâncias químicas em condições de exposição ambiental mais realista, ou seja, a influência de fatores bióticos, abióticos e suas interações na resposta aos efeitos observados nos organismos.

Esses estudos podem ser realizados com tanques artificiais, lagoas ou englobando partes de ecossistemas existentes, ou seja, são construídos de modo a simular parte de um ecossistema aquático natural, contendo matrizes ambientais e boa diversidade de organismos, grupos funcionais e habitats. Assim, são observados efeitos na comunidade e no ecossistema, potenciais efeitos indiretos e potencial de recuperação de *end-points* sensíveis (Organisation for Economic Co-Operation and Development, 2006). Mesocosmos construídos para avaliar o efeito de secamento do leito de rios na comunidade bentônica foram utilizados em Vadher et al. (2017), uma vez que a subsuperfície de sedimentos é um local de refúgio na época seca para esses organismos. Nesse caso, o mesocosmo permitiu a observação de migrações verticais dos animais, o que não é possível no ambiente natural. Microcosmos também são utilizados para a avaliação toxicológica de sedimentos contaminados, tais como o inseticida lufenuron (Brock et al., 2016). Nesta última pesquisa, um dos objetivos foi a validação de ensaios de laboratório com uma espécie em estudos com populações e comunidade macrobentônica.

## Metabarcoding

Os recentes avanços na área de genômica e tecnologia de sequenciamento de DNA de alto desempenho (next generation sequencing – NGS) favoreceram o desenvolvimento de abordagens holísticas para acesso e avaliação da composição de organismos de todo um ecossistema, organismos estes que não dependem de isolamento, cultivo e identificação morfológica. O sequenciamento de DNA ambiental (environmental DNA – eDNA) por NGS provê uma plataforma que permite acessar simultaneamente um espectro maior da biodiversidade, sem requerer amostragens complexas ou dispendiosas, estrutura nem pessoal qualificado para efetuar identificação morfológica.

O DNA de amostra ambiental pode ser obtido a partir de água, sedimento de rios e mares, solo, ar e efluentes ou, ainda, de ecossistemas como intestino ou pele e rizosfera ou filoplano, por exemplo, em animais e vegetais, respectivamente, e tem sido extensivamente empregado para acessar a dinâmica espaço-temporal de comunidades de organismos e, assim, gerar as bases para avaliar o grau de conservação ou o estágio de recuperação de determinado ambiente (Lee et al., 2011; Bourlat et al., 2013; Drummond et al., 2015; Ininbergs et al., 2015; Tan et al., 2015; Woo et al., 2015). Em outras palavras, fortalecer os alicerces para um efetivo biomonitoramento.

Essa abordagem gera, simultaneamente, milhões de leituras de DNA provenientes dos organismos presentes na amostra e pode ser empregada para acessar a diver-

sidade biológica em diferentes ambientes. NGS a partir de eDNA obtido de solos foi empregado para avaliar o impacto do uso da terra e de propriedades físico-químicas na diversidade microbiana (Roesch et al., 2007; Lauber et al., 2009) e, também, o grau de conservação e impacto de diversos estressores na composição das comunidades de microrganismos e macroinvertebrados em corpos de água doce e dos mares (Kisand et al., 2012; Bourlat et al., 2013; Costa et al., 2015; Xie et al., 2017).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em pesquisas realizadas pela Embrapa Meio Ambiente, os bioindicadores para avaliação da qualidade ambiental têm sido aplicados para identificação de impactos, principalmente para aqueles que afetam os ecossistemas de água doce. As abordagens que envolvem a manipulação das espécies em laboratório mostram-se muito eficientes, especialmente para os organismos que podem ser cultivados em condições de controle. Isso se justificaria pelos aspectos biológicos mais generalistas, os quais se adaptam a diversos tipos de habitats. Tais condições possibilitam obter resultados mais específicos, relacionando diretamente os agentes causadores dos impactos à história da vida das espécies, como alterações moleculares, morfológicas e ciclo de vida. Com relação às abordagens comunitárias, as respostas possibilitam algumas generalizações a respeito do efeito das alterações ambientais. Ressalta-se que a abordagem comunitária com utilização de bioindicadores enfrenta diversos desafios, especialmente para as limitações relacionadas às dificuldades impostas pelas restrições de identificações taxonômicas específicas e de registros genéticos. Tais dificuldades impõem aos estudos ecológicos dos macroinvertebrados aquáticos algumas restrições para a conclusão de resultados mais refinados. No entanto, ainda assim, mostram-se aplicáveis as análises de atividades antrópicas e decisões de gestão de preservação e recuperação dos processos ecológicos dos ecossistemas aquáticos. A respeito da aplicabilidade no campo educacional, os projetos aplicados pela Embrapa Meio Ambiente têm mostrado o uso de bioindicadores como importantes elementos da prática de sensibilização da comunidade em programas de educação ambiental, bem como daqueles com aplicação das boas práticas de gestão dos recursos hídricos. Assim, ressalta-se que as contínuas melhorias e atualizações de pesquisas ambientais têm proporcionado o aprimoramento e a especialização técnica, além de promover a relevância da atuação da Embrapa nos esforços para as boas práticas e conservação dos recursos hídricos.

## REFERÊNCIAS

- ADAMS, S. M. **Biological indicators of aquatic ecosystem stress**. Bethesda: American Fisheries Society, 2002. 644 p.
- ADAMS, W. J.; ROWLAND, C. D. Aquatic toxicology test methods. In: HOFFMAN, D. J.; RATTNER, B. A.; BURTON JUNIOR, A.; CAIRNS JUNIOR, J. (ed.). **Handbook of ecotoxicology**. Boca Raton: CRC, 2003. p. 19-43.
- ALLABY, M. **The concise Oxford dictionary of Zoology**. Oxford: Oxford University, 1992. 442 p.
- ALLEN, M.; BABIKER, M.; CHEN, Y.; CONINCK, H. de; CONNORS, S.; DIEMEN, R. v.; DUBE, O. P.; EBI, H. L.; ENGELBRECHT, F.; FERRAT, M.; FORD, F.; FORSTER, P.; FUSS, S.; BOLAÑOS, T. G.; JORDAN, H.; HOEGH-GULDBERG, O.; HOURCADE, J.-C.; HUPPMANN, D.; JACOB, D.; JIANG, J.; JOHANSEN, T. G.; KAINUMA, M.; KLEIJNE, K. de; KRIEGLER, E.; LEY, D.; LIVERMAN, D.; MAHOWALD, N.; MASSON-DELMOTTE, V.; MATTHEWS, J. B. R.; MILLAR, R.; MINTENBECK, K.; MORELLI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; MUNDACA, L.; NICOLAI, M.; OKEREKE, C.; PATHAK, M.; PAYNE, A.; PIDCOCK, R.; PIRANI, A.; POLOCZANSKA, E.; PÖRTNER, H.; REVI, A.; RIAHI, K.; ROBERTS, D. C.; ROGELJ, J.; ROY, J.; SENEVIRATNE, S. I.; SHUKLA, P. R.; SKEA, J.; SLADE, R.; SHINDELL, D.; SINGH, C.; SOLECKI, W.; STEG, L.; TAYLOR, M.; TSCHAKERT, P.; WAISMAN, H.; WARREN, R.; ZHAI, P.; ZICKFELD, K. Summary for Policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V., P.; ZHAI, H.-O.; PÖRTNER, D. R.; SKEA, J.; SHUKLA, P. R.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J. B. R.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M.I.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T. (ed.). **Aquecimento global de 1,5°C: Relatório especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)...** Brasília, DF: MCTIC, 2019. 24 p. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/07/SPM-Portuguese-version.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2021.
- ALTSCHUL, S. F.; GISH, W.; MILLER, W.; MYERS, E. W.; LIPMAN, D. L. Basic local alignment search tool. **Journal of Molecular Biology**, v. 215, n. 3, p. 403-410, 1990. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0022-2836\(05\)80360-2](https://doi.org/10.1016/S0022-2836(05)80360-2).
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. **Standard test method for measuring the toxicity of sediment-associated contaminants with freshwater invertebrates**. West Conshohocken: ASTM, 2005. 118 p. (E1706-05).
- ANSAH, Y. B.; FRIMPONG, E. A.; AMISAH, S. Characterization of potential aquaculture pond effluents, and physico-chemical and microbial assessment of effluent-receiving waters in central Ghana. **African Journal of Aquatic Science**, v. 38, n. 2, p. 185-192, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2989/16085914.2013.767182>.
- ARMITAGE, P. D.; CRANSTON, P. S.; PINDER, L. C. V. (ed.). **The Chironomidae: biology and ecology of non-biting midges**. 7.ed. London: Chapman & Hall, 1995. 572 p.
- ÁVILA, M. P.; CARVALHO, R. N.; CASATTI, L.; SIMIÃO-FERREIRA, J.; MORAIS, L. F. de; TERESA, F. B. Metrics derived from fish assemblages as indicators of environmental degradation in Cerrado streams. **Zoologia**, v. 35, e12895, 2018. DOI : <https://doi.org/10.3897/zoologia.35.e12895>.
- BABEL, S.; DACERA, D. D. M. Heavy metal removal from contaminated sludge for land application: A review. **Waste Management**, v. 26, n. 9, p. 988-1004, 2006.
- BERTOLO, A. P.; LANÇANOVA, D.; MUZZOLON, E.; TRENTO, A.; BAINY, E. M.; PASSOS, C. T. Experiência do uso das boas práticas de fabricação para melhoria das condições higiênico-sanitárias da

feira do agricultor de Laranjeiras do Sul-PR. **Revista Brasileira de Extensão Universitária**, v. 7, n. 1, p. 51-57, 2016. DOI: <https://doi.org/10.36661/2358-0399.2016v7i1.3101>.

BORISENKO, A. V.; SONES, J. E.; HEBERT, P. D. N. The front-end logistics of DNA barcoding: challenges and prospects. **Molecular Ecology Resources**, v. 9, p. 27-34, 2009. Supplement 1.

BOURLAT, S. J.; BORJA, A.; GILBERT, J.; TAYLOR, M. I.; DAVIES, N.; WEISBERG, S. B.; GRIFFITH, J. F.; LETTIERI, T.; FIELD, D.; BENZIE, J.; GLÖCKNER, F. O.; RODRÍGUEZ-EZPELETA, N.; FAITH, D. P.; BEAN, T. P.; OBST, M. Genomics in marine monitoring: new opportunities for assessing marine health status. **Marine Pollution Bulletin** v. 74, n. 1, p. 19-31, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.05.042>.

BROCK, T. C. M.; BAS, D. A.; BELGERS, J. D. M.; BIBBE, L.; BOERWINKEL, M.-C.; CRUM, S. J. H.; DIEPENS, N. J.; KRAAK, M. H. S.; VONK, J. A.; ROESSINK, I. Effects of sediment spiked lufenuron on benthic macroinvertebrates in outdoor microcosms and single-species toxicity tests. **Aquatic Toxicology**, v. 177, p. 464-475, 2016.

BROWN, K. S. Diversity, disturbance, and sustainable use of Neotropical forests: insects as indicators for conservation monitoring. **Journal of Insect Conservation**, v. 1, p. 25-42, 1997.

BUSS, D. F.; VITORINO, A. S. Rapid bioassessment protocols using benthic macroinvertebrates in Brazil: evaluation of taxonomic sufficiency. **Journal of the North American Benthological Society**, v. 29, n. 2, p. 562-571, 2010.

CETESB. **Relatório de qualidade das águas interiores do estado de São Paulo 2007**. São Paulo, 2008. 531 p.

CHESSMAN, B.; WILLIAMS, S.; BESLEY, C. Bioassessment of streams with macroinvertebrates: effect of sampled habitat and taxonomic resolution. **Journal of the North American Benthological Society**, v. 26, n. 3, p. 546-565, 2007.

CHIN, K. S.; LENTO, J.; CULP, J. M.; LACELLE, D.; KOKELJ, S. V. Permafrost thaw and intense thermokarst activity decreases abundance of stream benthic macroinvertebrates. **Global Change Biology**, v. 22, n. 8, p. 2715-2728, 2016. DOI : <https://doi.org/10.1111/gcb.13225>.

CHISTE, B. M.; TAKESHITA, N. A.; MATTIOLI, C. C.; JONSSON, C. M.; BARIZON, R. M.; HISANO, H. Risk assessment and acute toxicological effects of atrazine on Nile tilapia larvae after stress. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 56, n. 1, p. 23-29, 2021. DOI : <https://doi.org/10.1080/03601234.2020.1831863>.

CHOVANEC, A.; HOFER, R.; SCHIEMER, F. Fish as bioindicators. In: MARKERT, B. A.; BREURE, A. M.; ZECHMEISTER, H. G. (ed.). **Bioindicators & biomonitoring principles: concepts and applications**. Amsterdam: Elsevier, 2003. p. 639-676.

COONEY, J. D. Freshwater tests. In: RAND, G. M. (ed.). **Fundamentals of aquatic toxicology**. 2.nd. Boca Raton: Taylor & Francis, 1995. p. 71-98.

CORREIA, J. R. **Pedologia e conhecimento local: proposta metodológica de interlocução entre saberes construídos por pedólogos e agricultores em área de cerrado em Rio Pardo de Minas, MG**. 2005. 234 f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Agronomia, Rio de Janeiro.

CORREIA, L. C. S. **Contribuição para o conhecimento do gênero *Chironomus* Meigen, 1803 na região Neotropical**. 2004. 148 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. CORREIA, J. R.; FRANZ, C. A. B.; VILELA, M. F.; LIMA, H. C.; SANO, S. M.; MEDEIROS, M. B.; CARRARA, A. A.; BUSTAMANTE, P. G.; MACHADO, C. T. T.; CAVECHIA, L. A.; FERNANDES, S. G.; LIMA, V. V. F. Planejamento participativo de projeto de pesquisa em comunidades de agricultores familiares no Norte de Minas. In: SIMPÓSIO NACIONAL CERRADO, 9.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL SAVANAS TROPICAIS, 2., 2008, Brasília, DF. **Anais...** Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. 1 CD-ROM.

COSTA, P. S.; REIS, M. P.; ÁVILA, M. P.; LEITE, L. R.; DE ARAÚJO, F. M. G.; SALIM, A. C. M.; OLIVEIRA, G.; BARBOSA, F.; CHARTONE-SOUZA, E.; NASCIMENTO, A. M. A. Metagenome of a microbial community inhabiting a metal-rich tropical stream sediment. **PLoS ONE**, v. 10, n. 3, e0119465, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119465>.

COURTNEY, G. W.; MERRITT, R. W. Larvae of aquatic Diptera. In: MERRITT, R. W.; CUMMINS, K. W.; BERG, M. B. (ed.). **An introduction to the aquatic insects of North America**. Iowa: Kendall Hunt, 2008. p. 687-722.

DIAS, D. V.; SILVA, M. S. G. M. e; LOSEKANN, M. E.; LUIZ, A. J. B.; ISHIKAWA, M. M. Parasitofauna dos peixes e sua relação com a qualidade do ambiente em viveiros de tilápias. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12., 2018, Campinas. **Anais...** Campinas: Instituto Agrônômico, 2018. n. 18402.

DIDHAM, R. K. Altered leaf-litter decomposition rates in tropical forest fragments. **Oecologia**, v. 116, n. 3, p. 397-406, 1998.

DORNFELD, C. B. **Utilização de *Chironomus* sp (Diptera, Chironomidae) para a avaliação da qualidade de sedimentos e contaminação por metais**. 2006. 239 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

DRUMMOND, A. J.; NEWCOMB, R. D.; BUCKLEY, T. R.; XIE, D.; DOPHEIDE, A.; POTTER, B.; HELED, J.; ROSS, H.; TOOMAN, L. K.; GROSSER, S.; PARK, D.; DEMETRAS, N. J.; STEVENS, M. I.; RUSSELL, J. C.; ANDERSON, S. H.; CARTER, A. L.; NELSON, N. J. Evaluating a multigene environmental DNA approach for biodiversity assessment. **GigaScience**, v. 4, article 46, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13742-015-0086-1>.

DUARTE, A. S.; GIRÃO, E. G.; SOUSA, F. D. M.; SILVA, F. N.; ANTUNES, H. R. Monitoramento participativo da qualidade da água e diagnóstico ambiental participativo: metodologias para a gestão integrada dos recursos naturais no Semiárido. In: Encontro de Iniciação Científica da Embrapa Agroindústria Tropical, 8., 2010, Fortaleza. **Resumos...** Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2010.

ELENDT, B. P.; BIAS, W. R. Trace nutrient deficiency in *Daphnia magna* cultured in standard medium for toxicity testing. Effects of the optimization of culture conditions on life history parameters of *D. Magna*. **Water Research**, v. 24, n. 9, p. 1152-1167, 1990.

ENVIRONMENT CANADA. **Biological test method: test for survival and growth in sediment using the larvae of freshwater midges (*Chironomus tentans* or *Chironomus riparius*)**. Ontario, 1997. (EPS 1/RM/32).

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. **Is your drinking water safe?** Washington, D.C., 1989. 25 p. (EPA – 570/9-89-005).

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. **Methods for measuring the toxicity and bioaccumulation of sediment-associated contaminants with freshwater invertebrates**. 2nd. ed. Washington, D.C., 2000. 192 p. (EPA – 600-99/064).

ERIKSEN, T. E.; BRITAIN, J. E.; SØLI, G.; JACOBSEN, D.; GOETHALS, P.; FRIBERG, N. A global perspective on the application of riverine macroinvertebrates as biological indicators in Africa, South-Central America, Mexico and Southern Asia. *Ecological Indicators*, v. 126, article 107609, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107609>.

FIGUEIRÊDO, M. C. B.; VIEIRA, V. P. P. B.; MOTA, S.; ROSA, M. F.; ARAÚJO, L. F. P.; GIRÃO, E.; DUNCAN, B. L. Monitoramento comunitário da qualidade da água: uma ferramenta para a gestão participativa dos recursos hídricos no semi-árido. *REGA*, v. 5, n. 1, p. 51-60, 2008.

FIGUEIREDO JUNIOR, C. A.; VALENTE JUNIOR, A. S. Cultivos de tilápia no Brasil: origens e cenário atual. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 46., 2008, Rio Branco. *Anais...* Rio Branco: SOBER, 2008. p. 1-8.

FONSECA, A. L. *Avaliação da qualidade da água na bacia do Rio Piracicaba/SP através de testes de toxicidade com invertebrados*. 1997. 271 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

GALIC, N.; HENGEVELD, G. M.; BRINK, P. J. van den; SCHMOLKE, A.; THORBEC, P.; BRUNS, E.; BAVECO, H. M. Persistence of aquatic insects across managed landscapes: effects of landscape permeability on re-colonization and population recovery. *PlosOne*, v. 8, n. 1, article e54584, 2013. DOI : <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054584>.

GIESY, J. P.; HOKE, R. A. Freshwater sediment toxicity bioassessment rationale for species selection and test design. *Journal of Great Lakes Research*, v.15, n. 4, p. 539-569, 1989.

GIRÃO, E. G.; RIBEIRO, H. A. Vigilantes da água: monitoramento participativo da qualidade da água na Bacia do Rio Jaguaribe – CE. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSIÃO, 8, 2009, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Associação Brasileira de Geologia e Engenharia Ambiental, 2009.

GLOBAL WATER WATCH. *CBWS Training in Chiapas, México: Community-Based Watershed Stewardship (CBWS) workshop with Certifications in Water Monitoring concluded September 7, 2013 in Montecristo, Chiapas, Mexico*. Auburn: University of Auburn, 2014. Disponível em : <https://wp.auburn.edu/gww/?cat=10>. Acesso em: 23 jul. 2021.

GULLICKSON, M. L.; LIUKKONEN, B. W. (ed.). *Guide to volunteer stream monitoring*. St. Paul: University of Minnesota, 2002. 108 p.

HAUER, F. R.; RESH, V. H. Macroinvertebrates. HAUER, F. R., LAMBERTI, G. A. (ed.). *Methods in stream ecology*. 3rd. ed. Boston: Academic Press, 2017. p. 297-319.

HEBERT, P. D. N.; CYWINSKA, A.; BALL, S. L.; DEWAARD, J. R. Biological identifications through DNA barcodes. *Proceedings of the Royal Society London, Series B: Biological Sciences*, v. 270, n. 1512, p. 313-321, 2003. DOI : <https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2218>.

HEBERT, P. D. N.; STOECKLE, M. Y.; ZEMLAK, T. S.; FRANCIS, C. M. Identification of birds through DNA barcodes. *Plos Biology*, v. 2, n. 10, p. 1657-1663, 2004.

HILL, J. K.; HAMMER, K. C.; LACE, L. A.; BANHAM, W. M. T. Effects of selective logging on tropical forest butterflies on Buru, Indonesia. *Journal of Applied Ecology*, v. 32, n. 4, p. 754-760, 1995.

HOLZENTHAL, R. W.; BLAHNIK, R. J.; PRATHER, A. L.; KJER, K. M. Order Trichoptera Kirby, 1813 (Insecta), caddisflies. *Zootaxa*, v. 1668, p. 639-698, 2007.

HOSOKAWA, M.; ENDO, G.; KURODA, K.; HORIGUCHI, S. Influence of sulfate, Ca and Mg on the acute toxicity of potassium dichromate to *Daphnia similis*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 46, n. 3, p. 461-465, 1991.

ININBERGS, K.; BERGMAN, B.; LARSSON, J.; EKMAN, M. Microbial metagenomics in the Baltic Sea: Recent advancements and prospects for environmental monitoring. *Ambio*, v. 44, n. 3, p. 439-450, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0663-7>.

JAGER, T.; POSTHUMA, L.; ZWART, D.; MEENT, D. Novel view on predicting acute toxicity: decomposing toxicity data in species vulnerability and chemical potency. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 67, n. 3, p. 311-32, 2007.

JANZEN, D. H.; HALLWACHS, W.; BLANDIN, P.; BURNS, J. M.; CADIOU, J. M.; CHACON, I.; DAPKEY, T.; DEANS, A. R.; EPSTEIN, M. E.; ESPINOZA, B.; FRANCLEMONT, J. G.; HABER, W. A.; HAJIBABAEI, M.; HALL, J. P. W.; HEBERT, P. D. N.; GAULD, I. D.; HARVEY, D. J.; HAUSMANN, A.; KITCHING, I. J.; LAFONTAINE, D.; LANDRY, J. F.; LEMAIRE, C.; MILLER, J. Y.; MILLER, J. S.; MILLER, L.; MILLER, S. E.; MONTERO, J.; MUNROE, E.; GREEN, S. R.; RATNASINGHAM, S.; RAWLINS, J. E.; ROBBINS, R. K.; RODRIGUEZ, J. J.; ROUGERIE, R.; SHARKEY, M. J.; SMITH, M. A.; SOLIS, M. A.; SULLIVAN, J. B.; THIAUCOURT, P.; WAHL, D. B.; WELLER, S. J.; WHITFIELD, J. B.; WILLMOTT, K. R.; WOOD, D. M.; WOODLEY, N. E.; WILSON, J. J. Integration of DNA barcoding into an ongoing inventory of complex tropical biodiversity. *Molecular Ecology Resources*, v. 9, p. 1-26, 2009. Supplement s1. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1755-0998.2009.02628.x>.

JOHNSON, R. C.; CARREIRO, M. M.; JIN, H. S.; JACK, J. D. Within-year temporal variation and life-cycle seasonality affect stream macroinvertebrate community structure and biotic metrics. *Ecological Indicators*, v. 13, n. 1, p. 206-214, 2012.

JONSSON, C. M.; MAIA, A. H. N. Avaliação da toxicidade do lodo de esgoto de duas estações de tratamento para o invertebrado aquático *Daphnia similis*. *Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, v. 17, p. 1-8, 2007.

KARPOWICZ, M.; SŁUGOCKI, L.; KOZŁOWSKA, J.; OCHOCKA, A.; LÓPEZ, C. Body size of *Daphnia cucullata* as an indicator of the ecological status of temperate lakes. *Ecological Indicators*, v. 117, article 106585, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106585>.

KISAND, V.; VALENTE, A.; LAHM, A.; TANET, G.; LETTIERI, T. Phylogenetic and functional metagenomic profiling for assessing microbial biodiversity in environmental monitoring. *PLoS ONE*, v. 7, n. 8, e43630, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043630>.

KOLKOWITZ, R.; MARSSON, M. Ökologie der tierischen Saprobien. Beiträge zur Lehre von der biologischen Gewässerbeurteilung. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, v. 2, n. 1-2, p. 126-152, 1909.

LAMBERT, O.; PIROUX, M.; PUYO, S.; THORIN, C.; LARHANTEC, M.; DELBAC, F.; POULIQUEN, H. Bees, honey and pollen as sentinels for lead environmental contamination. *Environmental Pollution*, v. 170, p. 254-259, 2012.

LANDEIRO, V. L.; LUIS BINI, M.; COSTA, F. R. C.; FRANKLIN, E.; NOGUEIRA, A.; SOUZA, J. L. P.; MORAES, J.; MAGNUSSON, W. E. How far can we go in simplifying biomonitoring assessments? An integrated analysis of taxonomic surrogacy, taxonomic sufficiency and numerical resolution in a megadiverse region. *Ecological Indicators*, v. 23, p. 366-373, 2012.

LAUBER, C. L.; HAMADY, M.; KNIGHT, R.; FIERER, N. Pyrosequencing-based assessment of soil pH as a predictor of soil bacterial community structure at the continental scale. *Applied and environmental microbiology*, v. 75, n. 15, p. 5111-5120, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.00335-09>.

LEE, C. K.; BARBIER, B. A.; BOTTOS, E. M.; MCDONALD, I. R.; CARY, S. C. The inter-valley soil comparative survey: the ecology of Dry Valley edaphic microbial communities. *ISME Journal*, v. 6, n. 5, p. 1046-1057, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1038/ismej.2011.170>.

LOBO, T. F.; GRASSI FILHO, H.; BULLI, L. T.; KUMMERI, A. C. B. Efeito do lodo de esgoto e do nitrogênio nos fatores produtivos do girassol. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 5, p. 504-509, 2013.

LUIZ, A. J. B.; SILVA, M. S. G. M. e.; LOSEKANN, M. E. Influência do número de coletores na caracterização de macroinvertebrados bentônicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AQUICULTURA E BIOLOGIA AQUÁTICA, 8., 2018, Natal. **Um olhar para a inovação: resumos**. Londrina: Sociedade Brasileira de Aquicultura e Biologia Aquática, 2018.

MACHADO, C. T. de T.; FERNANDES, S. G.; VILELA, M. de F.; CORREIA, J. R.; FERNANDES, L. A. Caracterização dos sistemas de produção em propriedades de pequenos agricultores da Comunidade Água Boa 2, em Rio Pardo de Minas, MG. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. 59 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 229).

MALLASEN, M.; CARMO, C. F.; TUCCI, A.; BARROS, H. P.; ROJAS, N. E. T.; FONSECA, F. S.; YAMASHITA, E. Y. Water quality in Cage system fish farm in Ilha Solteira reservoir, SP. *Boletim do Instituto de Pesca*, v. 38, n. 1, p. 15-30, 2012.

MATTIOLI, C. C.; CHISTE, B. M.; TAKESHITA, N. A.; JONSSON, C. M.; FERRACINI V. L.; HISANO, H. Acute toxicity and risk assessment of florfenicol for Nile tilapia larvae. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 105, n. 5, p. 721-727, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-020-03013-6>.

MAZZONI-VIVEIROS, S. C.; TRUFEM, S. F. B. Efeitos da poluição aérea e edáfica no sistema radicular de *Tibouchina pulchra* Cogn. (Melastomataceae) em área de mata Atlântica: associações micorrízicas e morfologia. *Revista Brasileira de Botânica*, v. 27, p. 337-348, 2004.

MCGEOCH, M. A. The selection, testing and application of terrestrial insects as bioindicators. *Biology Review*, v. 73, p. 181-201, 1998.

MELO, L. A. da S.; SILVA, J. R. da. **Método de isca para avaliação populacional de cupins subterrâneos como indicadores de impacto ambiental**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2008. 2 p. (Embrapa Meio Ambiente. Comunicado Técnico, 48).

MONTELES, J. S.; GERHARD, P.; FERREIRA, A.; SONODA, K. C. Agriculture impacts benthic insects on multiple scales in the Eastern Amazon. *Biological Conservation*, v. 255, article 108998, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.108998>.

MOOG, O.; SCHMUTZ, S.; SCHWARZINGER, I. Biomonitoring and bioassessment. In: SCHMUTZ, S.; SENDZIMIR, J. (ed.). *Riverine ecosystem management*. Cham: Springer, 2018. p. 371-390. (Aquatic Ecology Series, v. 8).

MOURA E SILVA, M. S. G. e; QUEIROZ, J. F. de; CESNIK, R.; FERRAZ, J. M. G.; MORAES, J. F. Assessment of Oriçanga and Itupeva rivers water quality at the Pardo-Mogi watershed (São Paulo State, Brazil). *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 22, n. 3, p. 335-343, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4322/actalb.02203010>.

NEWMANN, M. C.; UNGER, M. A. *Fundamentals of ecotoxicology*. 2nd. Boca Raton: CRC Pres, 2003. 458 p.

NOSS, R. F. Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach. *Conservation Biology*, v. 4, n. 4, p. 355-364, 1990.

NYESTE, K.; DOBROCSI, P.; CZEGLÉDI, I.; CZÉDLI, H.; HARANGI, S.; BARANYAI, E.; SIMON, E.; NAGY, S. A.; ANTAL, L. Age and diet-specific trace element accumulation patterns in different tissues of chub (*Squalius cephalus*): Juveniles are useful bioindicators of recent pollution. *Ecological Indicators*, v. 101, p. 1-10, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.001>.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. *Guidance document on simulated freshwater lentic field tests (outdoor microcosms and mesocosms)*. Paris, 2006. 34 p. (OECD Series on Testing and Assessment, 53). Disponível em: [https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/jm/mono\(2006\)17&doclanguage=en](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/jm/mono(2006)17&doclanguage=en). Acesso em: 22 mar. 2022.

OERTEL, N.; SALÁNKI, J. Biomonitoring and bioindicadores in aquatic ecosystems. In: AMBASHT, R. S.; AMBASHT, N. K. (ed.). *Modern trends in applied aquatic ecology*. New York: Kluwer Academic: Plenum, 2003. p. 219-246.

OLIVEIRA, M. A.; GOMES, C. F. F.; PIRES, E. M.; MARINHO, C. G. S.; DELLA LUCIA, T. M. C. Bioindicadores ambientais: insetos como um instrumento desta avaliação. *Revista Ceres*, v. 61, p. 800-807, 2014. Suplemento.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. *Antimicrobial use in aquaculture and antimicrobial resistance: report of a joint FAO/OIE/WHO expert consultation on antimicrobial use in aquaculture and antimicrobial resistance*. Seoul, 2006. 107 p.

ORLOFSKE, J. M.; BAIRD, D. J. The tiny mayfly in the room: implications of size-dependent invertebrate taxonomic identification for biomonitoring data properties. *Aquatic Ecology*, v. 47, n. 4, p. 481-494, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10452-013-9460-1>.

PARAIBA, L. C.; SAITO, M. L. Distribuição ambiental de poluentes encontrados em lodos de esgoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 40, n. 9, p. 853-860, 2005.

PILGRIM, E. M.; JACKSON, S. A.; SWENSON, S.; TURCSANYI, I.; FRIEDMAN, E.; WEIGT, L.; BAGLEY, M. Incorporation of DNA barcoding into a large-scale biomonitoring program: opportunities and pitfalls. *Journal of the North American Benthological Society*, v. 30, n. 1, p. 217-231, 2011. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/full/10.1899/10-012.1>. Acesso em: 17 mar. 2022.

PLESSL, C.; OTACHI, E. O.; KÖRNER, W.; AVENANT-OLDEWAGE, A.; JIRSA, F. Fish as bioindicators for trace element pollution from two contrasting lakes in the Eastern Rift Valley, Kenya: spatial and

temporal aspects. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 24, p. 19767-19776, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9518-z>.

PRADO, S. S. Cupins subterrâneos: perigo bem debaixo dos seus pés. **Revista Campo & Negócios - Florestas**, n. 17, p. 36-37, 2015.

PRICE, P. W. **Insect ecology**. 2nd. ed. New York: J. Wiley, 1984. 607 p.

RATNASINGHAM, S; HEBERT, P. D. N. BOLD: the barcode of life data system. **Molecular Ecology Notes**, v. 7, n. 3, p. 355-364, 2007. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1890991/pdf/men0007-0355.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2022.

ŘEZNÍČKOVÁ, P.; PETROVAJOVÁ, V.; NERUDO VÁ, J.; HADAŠOVÁ, L.; KOPP, R. The colonization of newly built fishponds by the macroinvertebrate assemblages. **Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis**, v. 64, n. 1, p. 141-149, 2016. DOI: <https://doi.org/10.11118/actaun201664010141>.

RIEDNER, L.; BERTOLINI, G.; RIBEIRO, I.; BRANDALISE, L. Avaliação da dimensão ambiental da sustentabilidade da agricultura familiar no Oeste do Estado do Paraná. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, v. 8, n. 1, p. 52-71, 2018.

RIVER HEALTH PROGRAMME. **State of rivers report: rivers of the Gouritz water management area**. Pretoria: Department of Water Affairs and Forestry, 2007. 56 p.

ROESCH, L. F.; FULTHORPE, R. R.; RIVA, A.; CASELLA, G.; HADWIN, A. K.; KENT, A. D.; DAROUB, S. H.; CAMARGO, F. A. O.; FARMERIE, W. G.; TRIPLETT, E. W. Pyrosequencing enumerates and contrasts soil microbial diversity. **ISME Journal**, v. 1, n. 4, p. 283-290, 2007. <https://doi.org/10.1038/ismej.2007.53>.

ROSENBERG, D. M.; RESH, V. H. (ed.). **Freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates**. New York: Chapman & Hall, 1993. 488 p.

ROSENBERG, D. M.; RESH, V. H. Recent trends in life-history research on benthic macroinvertebrates. **Freshwater Science**, v. 29, n. 1, p. 207-219, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1899/08-082.1>.

ROSINI, E. F.; TUCCI, A.; CARMO, C. F.; BARROS, H. P. Water quality in Ponte Pensa Aquaculture Park, Solteira Island Reservoir, SP, Brazil, where fish are cultivated under great-volume cage system. **Revista Ambiente e Água**, v. 14, n. 4, p. 1-14, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2382>.

SAJJAD, H. Terrestrial insects as bioindicators of environmental pollution: a review. **UW Journal of Science and Technology**, v. 4, p. 21-25, 2020.

SANTOS, J.; BARROS, G. Uso racional da água: ações interdisciplinares em escola rural do semiárido brasileiro. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, n. 1, p. 263-271, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1075>.

SAXENA, A.; TIWARI, A.; KAUSHIK, R.; IQBAL, H. M. N.; PARRA-SALDÍVAR, R. Diatoms recovery from wastewater: Overview from an ecological and economic perspective. **Journal of Water Process Engineering**, v. 39, article 101705, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101705>.

SHEFALI; KUMAR, R.; SANKHLA, M. S.; KUMAR, R.; SONONE, S. S. Impact of pesticide toxicity in aquatic environment. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, v. 11, n. 3, p. 10131-10140, 2021.

SIDDIG, A. A.; ELLISON, A. M.; OCHS, A.; VILLAR-LEEMAN, C.; LAU, M. K. How do ecologists select and use indicator species to monitor ecological change? *Ecological Indicators*, v. 60, p. 223-230, 2016.

SILVA, B. A.; LIMA, J. M. D.; FERNANDES, B. D.; BRITTO, L. H. R. Capacitação na criação animal em assentamentos no sertão da Paraíba. *Revista em Extensão*, v. 17, n. 2, p. 182-197, 2019. DOI: <https://doi.org/10.14393/REE-v17n22018-relo7>.

SILVA, M. S. G. M. e; GRACIANO, T. S.; LOSEKANN, M. E.; LUIZ, A. J. B. Assessment of benthic macroinvertebrates at Nile tilapia production using artificial substrate samplers. *Brazilian Journal of Biology*, v. 76, n. 3, p. 735-742, 2016.

SILVA, M. S. G. M. E; LOSEKANN, M. E.; LUIZ, A. J. B.; ISHIKAWA, M. M.; HISANO, H. Proposição de índices de qualidade de água para piscicultura baseado em macroinvertebrados bentônicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AQUICULTURA E BIOLOGIA AQUÁTICA, 8., 2018, Natal. *Um olhar para a inovação: resumos*. Londrina: Sociedade Brasileira de Aquicultura e Biologia Aquática, 2018.

SILVEIRA, M. P. *Aplicação do biomonitoramento para avaliação da qualidade da água em rios*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. 68 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos 36).

SIMÕES, F. S.; MOREIRA, A. B.; BISINOTI, M. C.; GIMENEZ, S. M. N.; YABE, M. J. S. Water quality index as a simple indicator of aquaculture effects on aquatic bodies. *Ecological Indicators*, v. 8, n. 5, p. 476-484, 2008.

SINGH, A.; SINGH, J. Recent approaches used in environmental monitoring methods. In: SINGH, J.; VYAS, A.; WANG, S.; PRASAD, R. (ed.). *Microbial biotechnology: basic research and applications*. Singapore: Springer, 2020. p. 355-368.

SISTE, C. E.; GIRAO, E. G.; DUNCAN, B. L. *Manual para formação e capacitação de grupos comunitários em metodologias participativas de monitoramento da qualidade da água - módulo III: avaliação físico-química*. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2011. 48 p. il. (Embrapa Agroindústria Tropical. Documentos, 135).

SONODA, K. C. *Comunidades de insetos aquáticos em dois trechos do Córrego Sarandi, Distrito Federal*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010a. 19 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 280).

SONODA, K. C. Estrutura da comunidade de insetos do Córrego Nova Vida, ecótono entre Floresta Amazônica e Cerrado. *Revista de Ciências Ambientais*, v. 4, n. 1, p. 37-46, 2010b.

SONODA, K. C. *Variação temporal da fauna de insetos aquáticos do Córrego Sarandi, DF*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010c. 23 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 291).

SONODA, K. C.; FONSECA, R. B. *Mistério no mundo aquático submerso*. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 32 p.

SONODA, K. C.; FONSECA, R. B.; SZERMAN, A. L. *Quem mexeu no meu córrego?* Brasília, DF: Embrapa, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/contando-ciencia/quem-mexeu-no-corrego-pagi>. Acesso em: 17 mar. 2022.

SONODA, K. C.; FONSECA, R. B.; ZANESCO, R. F.; SZERMAN, A. L. *Integração de unidades da Embrapa por meio da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia e o programa Embrapa & Escola: uma experiência no Distrito Federal*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2021. 48 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 371).

SONODA, K. C.; MATTHAEI, C. R.; TRIVINHO-STRIXINO, S. Contrasting land uses affect Chironomidae communities in two Brazilian rivers. **Fundamentals and Applied Limnology – Archiv für Hydrobiologie**, v. 174, n. 2, p. 173-184, 2009a. DOI: <https://doi.org/10.1127/1863-9135/2009/0174-0173>.

SONODA, K. C.; MONTELES, J. S.; FERREIRA, A.; GERHARD, P. **Chironomidae da Amazonia Oriental: resposta da funcionalidade alimentar aos diferentes usos/cobertura do solo**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2018a. (Embrapa Meio Ambiente. Comunicado Técnico, 57).

SONODA, K. C.; MONTELES, J. S.; FERREIRA, A.; GERHARD, P. Chironomidae from Eastern Amazon: understanding the differences of land-use on functional feeding groups. **Journal of Limnology**, v. 77, p. 196-202, 2018b. Supplement 1. Doi: <http://dx.doi.org/10.4081/jlimnol.2018.1799>.

SONODA, K. C.; ORTEGA, E.; VETTORAZZI, C. A.; TRIVINHO-STRIXINO, S. Chironomidae assemblage from four Brazilian watersheds under different anthropogenic pressure. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CHIRONOMIDAE, 17., 2009, Tianjin, China. **Program and abstracts...** Tianjin: Nakai University, 2009b. 1 CD-ROM.

SONODA, K. C.; VETTORAZZI, C. A.; ORTEGA, E. M. M. Relationship among landuse and composition of aquatic insects of four basins of São Paulo State. **Neotropical Biology and Conservation**, v. 6, n. 3, p. 187-200, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4013/nbc.2011.63.06>.

SOUSA, F. C. F. **Análise crítica da contribuição da Semana Nacional de Ciência e Tecnologia para a popularização do conhecimento científico**. 2015. 98 f. Dissertação (Mestrado em Educação para a Ciência) – Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bauru.

SOUSA, F. D. M. de; MORENO, B. dos S.; GIRAO, E. G.; SILVA, F. N. dos S. Programa Vigilantes da Água: gestão ambiental participativo: caso da comunidade Muquém-Ibicuitinga/CE. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 10., 2010, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2010.

SOUSA, R. C.; ARANHA, C. P.; SILVA, A. F. G.; ROCHA, J. R. #CiênciaÚtil: Semana Nacional de Ciência e Tecnologia em escolas de campo. **Revista Brasileira de Educação do Campo**, v. 4, e6110, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.20873/uftrbec.v4e6110>.

SPEIS, M.; REISS, F. Catalog and bibliography of neotropical and mexican Chironomidae (Insecta, Diptera). **Spixiana**, v. 22, p. 61-119, 1996.

SPITZER, K.; JAROS, J.; HAVELKA, J.; LEPS, J. Effect of small-scale disturbance on butterfly communities of an Indochinese montane rainforest. **Biological Conservation**, v. 80, p. 9-15, 1997.

STEPHENS, W. W.; FARRIS, J. L. Instream community assessment of aquaculture effluents. **Aquaculture**, v. 231, n. 1-4, p. 149-162, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.08.007>.

STOECKLE, M. Y.; HEBERT, P. D. N. Barcode of life. **Scientific American**, v. 299, n. 4, p. 82-88, 2008.

STRIXINO, S. T. **Estudos sobre a fecundidade de Chironomus sancarlensis sp. n. (Diptera: Chironomidae)**. 1980. 157 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Biociências. Universidade de São Paulo, São Paulo.

STRIXINO, S. T. A largura da cabeça na determinação das fases larvais de Chironomidae na Represa do Lobo, São Paulo. 1973. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

STRIXINO, G.; STRIXINO, S. T. A temperatura e o desenvolvimento larval de *Chironomus sancticaroli* (Diptera: Chironomidae). *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 3, n. 4, p. 177-180, 1985.

STRIXINO, S. T.; STRIXINO, G. Nova espécie do gênero *Chironomus* Meigen do sul do Brasil (Diptera: Chironomidae). *Revista Brasileira de Entomologia*, v. 25, n. 4, p. 333-340, 1980.

SUMUDUMALI, R. G. I.; JAYAWARDANA, J. M. C. K. A review of biological monitoring of aquatic ecosystems approaches: with special reference to macroinvertebrates and pesticide pollution. *Environmental Management*, v. 67, n. 2, p. 263-276, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01423-0>.

SWEENEY B. W.; BATTLE J. M.; JACKSON J. K.; DAPKEY T. Can DNA barcodes of stream macroinvertebrates improve descriptions of community structure and water quality? *Journal of the North American Benthological Society*, v. 30, p. 195-216, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1899/10-016.1>.

TACCOGNA, G; MUNRO, K. (ed.). *The streamkeepers handbook: a practical guide to stream and wetland Ccare*. Vancouver: Salmonid Enhancement Program, Department of Fisheries and Oceans, 1995. 340 p.

TAKESHITA, N. A.; CHISTE, B. M.; JONSSON, C. M.; MATTIOLI, C. C.; HISANO, H. Avaliação da toxicidade aguda de oxitetraciclina em pós-larvas de tilápia-do-nylo. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 13., 2019, Campinas. *Anais...* Campinas: Instituto Agrônômico, 2019.

TAKESHITA, N. A.; CHISTE, B. M.; JONSSON, C. M.; MATTIOLI, C. C.; HISANO, H. Avaliação de doses subletais e do risco ambiental da oxitetraciclina em larvas de tilápia-do-nylo submetidas à manejo de estresse. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 14., 2020, Campinas. *Anais...* Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2020.

TAN, B.; NG, C.; NSHIMYIMANA, J. P.; LOH, L. L.; GIN, K. Y.; THOMPSON, J. R. Next-generation sequencing (NGS) for assessment of microbial water quality: current progress, challenges, and future opportunities. *Frontiers in Microbiology*, v. 6, article 1027, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01027>.

TIBCHERANI, M.; NACAGAVA, V. A. F.; ARANDA, R.; MELLO, R. L. Review of ants (Hymenoptera: Formicidae) as bioindicators in the Brazilian Savanna. *Sociobiology*, v. 65, n. 2, p. 112-129, 2018.

TRIPLEHORN, C. A.; JOHNSON, N. F. *Estudo dos insetos*. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 816 p. VADHER, A. N.; LEIGH, C.; MILLETT, J.; STUBBINGTON, R.; WOOD, P. J. Vertical movements through subsurface stream sediments by benthic macroinvertebrates during experimental drying are influenced by sediment characteristics and species traits. *Freshwater Biology*, v. 62, n. 10, p. 1730-1740, 2017.

VANNOTE, R. L.; MINSHALL, G. W.; CUMMINS, K. W.; SEDELL, J. R.; CUSHING, C. E. The River continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 37, p. 130-137, 1980.

VIELTES, R. L.; DAIUTO, E. R.; CAMPOS, A. J. Políticas públicas para a capacitação familiar com produtos hortícolas orgânicos. *Revista Ciência em Extensão*, v. 8, n. 3, p. 289-293, 2012.

VILELA, M. de F.; CORREIA, J. R.; SANO, S. M.; SEVILHA, A. C.; MACHADO, C. T. de T.; FERNANDES, S. G.; CARRARA, A. A.; FRANZ, C. A. B. **Mapeamento e análise da dinâmica de uso e da cobertura do solo em comunidades tradicionais do Alto Rio Pardo, Minas Gerais**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2009. 31 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa, 236).

VUATAZ, L.; SARTORI, M.; GATTOLLIAT, J. L.; MONAGHAN, M. T. Endemism and diversification in freshwater insects of Madagascar revealed by coalescent and phylogenetic analysis of museum and field collections. **Molecular Phylogenetics and Evolution**, v. 66, n. 3, p. 979-991, 2013.

WAITE, I. R.; HERLIHY, A. T.; LARSEN, D. P.; URQUHART, N. S.; KLEMM, D. J. The effects of macroinvertebrate taxonomic resolution in large landscape bioassessments: an example from the Mid-Atlantic Highlands. U.S.A. **Freshwater Biology**, v. 49, n. 4, p. 474-489, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2004.01197.X>.

WALD, A. Test of statistical hypotheses concerning general parameters when the number of observations is large. **Transactions of the American Mathematical Society**, v. 54, n. 3, p. 462-482, 1943.

WARWICK, W. F. **The use of morphological deformities in Chironomid larvae for biological effects monitoring**. Canada: Minister of Supply and Services, 1990. 34 p.

WOO, A. C.; BRAR, M. S.; CHAN, Y.; LAU, M. C.; LEUNG, F. C.; SCOTT, J. A.; VRIJMOED, L. L. P.; ZAWAR-REZAF, P.; POINTING, S. B. Temporal variation in airborne microbial populations and microbially-derived allergens in a tropical urban landscape. **Atmospheric Environment**, v. 74, p. 291-300, 2013. DOI <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.03.047>.

XIE, Y.; HONG, S.; KIM, S.; ZHANG, X.; YANG, J.; GIESY, J. P.; WANG, T.; LU, Y.; YU, H.; KHIM, J. S. Ecogenomic responses of benthic communities under multiple stressors along the marine and adjacent riverine areas of northern Bohai Sea, China. **Chemosphere**, v. 172, p. 166-174, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.121>.

XU, M.; WANG, Z.; DUAN, X.; PAN, B. Effects of pollution on macroinvertebrates and water quality bio-assessment. **Hydrobiologia**, v. 729, p. 247-259, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1504-y>.

ZAGATTO, P.; BERTOLLETI, E. (ed.). **Ecotoxicologia aquática: princípios e aplicações**. São Carlos: Rima, 2006. 464 p.

ZHOU, X.; JACOBUS, L. M.; DEWALT, R. E.; ADAMOWICZ, S. J.; HEBERT, P. D. N. Ephemeroptera, Plecoptera, and Trichoptera fauna of Churchill (Manitoba, Canada): insights into biodiversity patterns from DNA barcoding. **Journal of the North American Benthological Society**, v. 29, n. 3, p. 814-837, 2010.

# MONITORAMENTO HIDROLÓGICO EM BACIAS AGRÍCOLAS

*Ricardo de Oliveira Figueiredo, Alexandre Ortega Gonçalves, Anderson Soares Pereira, Gustavo Bayma, Kathia Cristhina Sonoda, Marco Antonio Ferreira Gomes, Maria Lucia Zuccari, Mariana Silveira Guerra Moura e Silva, Pedro Gerhard, Robson Rolland Monticelli Barizon, Sandra Furlan Nogueira e Vera Lúcia Ferracini.*

## INTRODUÇÃO

Em diversos países, a bacia hidrográfica é utilizada como unidade de planejamento e gerenciamento, compatibilizando os diversos usos e interesses e garantindo a adequada qualidade e quantidade da água. A bacia hidrográfica é, portanto, uma ferramenta relevante de gestão ambiental, na qual se faz necessário o manejo adequado dos recursos naturais para que todos possam usufruí-los de forma sustentável, para melhor aproveitamento em benefício da sociedade. Essa unidade da paisagem possui caráter integrador e possibilita o acompanhamento das mudanças introduzidas pelo homem e as respectivas respostas da natureza. (Machado, 2003; Guerra; Cunha, 1996).

As ações antrópicas são responsáveis por modificações consideráveis no meio ambiente, as quais podem ser amplamente detectáveis nas bacias hidrográficas. Tais alterações apresentam influência quantitativa e qualitativa direta sobre os processos hidrológicos que podem ser avaliados pelo monitoramento hidrossedimentológico, ou seja, a avaliação das entradas e das saídas de água e sedimentos do sistema hídrico em foco. De forma geral, o resultado dessas modificações é percebido mais claramente quando da ocorrência de eventos hidrológicos extremos e de suas consequências, tais como estiagens severas, inundações e destruições, produção, transporte e deposição de sedimentos. Os efeitos imediatos desse cenário contemplam o assoreamento de cursos d'água, prejuízo severo às atividades agrícolas e aumento no aporte de nutrientes, ocasionando impacto negativo direto na qualidade da água.

O estudo hidrológico em sistemas de produção agrícola, em nível de bacias hidrográficas, é de grande importância uma vez que permite conhecer a disponibilidade hídrica, dar suporte ao melhor uso da água e dos solos e ainda, promover a geração de dados que podem ser trabalhados visando reduzir as perdas de solo pela erosão. Nesses sistemas é fundamental o estudo da rede de drenagem e das caracte-

rísticas físicas da bacia hidrográfica, bem como a sua interação com a morfologia do local, com destaque para o relevo e os atributos físico-hídricos e de uso do solo. Tais atributos interferem de forma significativa no ciclo hidrológico da bacia e, principalmente, na infiltração e no escoamento superficial. A intensidade do escoamento superficial não é produto apenas resultante do volume de precipitação pluvial, mas também das características do solo e do relevo. Isso ocorre porque o escoamento começa quando o solo está saturado e a infiltração sofre estabilização, motivo pelo qual para a compreensão desse processo é obtida a partir do estudo topográfico e pedológico (Almeida, 2016).

Nesse contexto, a realização de estudos hidrológicos em bacias hidrográficas surge da necessidade de se compreender o funcionamento dos fluxos hídricos, dos processos que controlam o movimento da água e seus prováveis impactos sobre a quantidade e a qualidade da água. Para melhor compreensão desses fenômenos em bacias hidrográficas, têm sido adotados modelos para estudar cenários preditivos, definidos como ferramentas desenvolvidas para avaliação dos processos hidrológicos em diferentes escalas espaciais e temporais (Spruill et al., 2000). Para Wagener et al. (2004), os modelos hidrológicos que utilizam diferentes escalas espaciais e temporais podem ser aplicados na avaliação de estratégias de gerenciamento de recursos hídricos, na resposta de bacias hidrográficas a variações climáticas periódicas, na avaliação de cheias e períodos de pico de precipitação, cheias em tempo real e em condições de contorno para modelos de circulação atmosférica.

Com o advento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), os modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos e aplicados com maior embasamento físico, permitindo a representação dos parâmetros dos modelos, de forma distribuída e com maior versatilidade (Veith et al., 2010). Acrescente-se a esses aspectos, o fato de que a integração da hidrologia ao SIG contribui para um aumento expressivo na obtenção de informações que, uma vez integradas, apresentam-se enriquecidas de detalhes, resultado da captura, armazenamento, manipulação, análise e visualização de um conjunto variado de dados georreferenciados (Vieux, 2004).

No conjunto de abordagens sobre o monitoramento hidrológico de bacias hidrográficas insere-se os chamados processos hidrobiogeoquímicos fundamentais por abordar a caracterização da dinâmica hidrobiogeoquímica da bacia e sua variação espaço-temporal; a investigação da influência da vegetação ripária na qualidade da água oriunda das áreas de restauração; a análise dos efeitos de uso das terras na qualidade dos corpos d'água; a investigação de possíveis fontes antrópicas de degradação presentes na bacia; a estimativa de fluxos hidrogenoquímicos e o cálculo do balanço de massa dos elementos químicos de interesse e ainda a investigação de possíveis fontes de matéria orgânica presentes na água fluvial, com auxílio da análise isotópica do carbono de acordo com Reis (2018).

O estudo hidrobiogeoquímico baseia-se no fato de que na bacia hidrográfica todos os componentes da paisagem interagem: atmosfera e vegetação, plantas e solo, rocha e os corpos hídricos superficiais e subterrâneos. Como abordado por Figueiredo; Green (2019), a avaliação das águas fluviais, por exemplo, tem como pano de fundo o fato de que os rios dependem, para sua existência, da água da chuva que carrega o que possa ser mobilizado pela sua ação física e/ou química, resultando nos produtos solúveis ou particulados transportados pelos rios. As variações temporal e espacial no transporte de solutos são reguladas tanto pela composição química e volume das águas das chuvas, quanto pelas características da bacia - litologia, solo, relevo e vegetação. Além disso, a dinâmica hidrológica do sistema, com suas velocidades associadas, tempos de residência e magnitude dos estoques, interfere decisivamente nestas variações (Walling; Webb, 1986). Assim, a composição química da água fluvial, resultado dos fluxos de ânions e cátions inorgânicos e da matéria orgânica dissolvida, retrata as características hidrobiogeoquímicas da paisagem, a depender dos componentes da bacia anteriormente citados (Moldan; Cerný, 1994).

A entrada no ambiente de elementos químicos presentes nos insumos utilizados na agricultura requer avaliações tanto da interferência das atividades agrícolas nos fluxos biogeoquímicos, como da contaminação que ocasiona consequências negativas para a qualidade da água e para a saúde do ecossistema aquático. Sabe-se que a natureza orgânica das moléculas dos pesticidas permite sua degradação, fazendo-se necessário estudar os destinos e as consequências do transporte dessas moléculas e seus resíduos (Mattos; Silva, 1999). Quando os agrotóxicos são introduzidos, os recursos hídricos, sejam superficiais ou subterrâneos, são o seu principal destino. Na maioria das vezes, a concentração dos pesticidas em água é baixa, em parte por serem geralmente pouco solúveis e em parte devido ao efeito de diluição. Entretanto, mesmo nessas concentrações, tais produtos representam riscos para algumas espécies de organismos aquáticos, que podem concentrá-las em até 1000 vezes (Ferracini et al., 2001).

De fato, poucos estudos sobre o monitoramento de pesticidas em bacias hidrográficas têm sido realizados no Brasil. Os dados disponíveis representam um número limitado de corpos d'água, que raramente trazem as informações necessárias para a adequada interpretação de seus resultados (Albuquerque et al., 2016). Também são poucas as iniciativas do setor público nesse tema, com destaque para os programas estaduais de monitoramento de pesticidas em água dos estados de São Paulo e Santa Catarina. Dessa maneira, as avaliações apresentadas nesse capítulo apresentam informações importantes para o tema em questão.

Por outro lado, os macroinvertebrados bentônicos podem ser usados como bioindicadores de qualidade da água com grande vantagem no monitoramento de bacias, pois esses organismos possuem várias características desejáveis para um indicador (Silva et al., 2012). Dependendo da espécie, o seu ciclo de vida pode se estender desde

alguns dias a mais de um ano. Dessa maneira, eles também podem indicar alterações ambientais a médio e longo prazo, integrando tais alterações ao longo do tempo, e assim apresentar certa vantagem em relação às avaliações hidrobiogeoquímicas, as quais necessitam maior número e frequência de amostragens para avaliar a qualidade da água numa mesma escala de tempo.

Por sua vez, a Avaliação dos Ecossistemas do Milênio (Millennium Ecosystem Assessment – MEA), iniciativa mundial e pioneira, classifica os serviços ecossistêmicos em quatro categorias: a) provisão (ou de abastecimento); b) regulação, representam processos que garantem o funcionamento do ecossistema em longo prazo; c) suporte, que dão suporte a outras funções; e d) culturais, que está relacionado à capacidade dos ecossistemas naturais favorecerem o bem-estar do ser humano (Millennium Ecosystem Assessment, 2003). Um dos principais desafios dos sistemas de classificação de serviços ecossistêmicos é lidar com a alta complexidade do funcionamento dos ecossistemas e a complexa dinâmica que caracteriza as ligações entre processos, funções e serviços em diferentes escalas temporais e espaciais. A mudança do uso da terra (MUT), em decorrência da expansão agrícola e da supressão da cobertura vegetal natural, representa um dos fatores de pressão sobre os ecossistemas terrestres e aquáticos. Assim, a MUT acarreta mudanças na disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos em bacias hidrográficas (Nóbrega et al., 2018), podendo, portanto, afetar a capacidade dos sistemas naturais de fornecer serviços ecossistêmicos (Metzger et al., 2006).

Frente ao exposto, o objetivo do presente capítulo é mostrar a relevância do monitoramento hidrológico para a sustentabilidade da agricultura brasileira e a avaliação de serviços ambientais hídricos, enfatizando alguns trabalhos de pesquisa em bacias hidrográficas, desenvolvidos pela Embrapa Meio Ambiente e seus parceiros. Os resultados gerados nessas pesquisas podem embasar iniciativas para gestão de bacias hidrográficas e para a adoção de sistemas de produção sustentáveis na agricultura tropical, culminando com a conservação dos recursos naturais e a preservação ambiental nos ecossistemas envolvidos.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO MONITORAMENTO DE BACIAS

Para a execução do monitoramento de bacias torna-se necessário embasar-se no conhecimento técnico-científico de diversas áreas da ciência. Destacamos abaixo aquelas relacionadas à caracterização fisográfica da paisagem, a relação com a gestão ambiental, e a hidrobiogeoquímica, envolvendo conhecimentos da hidrologia, química, biologia, geologia e ecologia aquática.

## Caracterização da bacia - um item essencial para o monitoramento

A bacia hidrográfica pode ser definida como uma área de captação natural da água de precipitação pluviométrica que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. É composta por um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no seu exutório. É um sistema aberto e oferece trocas contínuas de matéria e energia pela pedosfera, a atmosfera, a hidrosfera e a biosfera, o que proporciona a percolação da água e os processos biológicos. Na bacia hidrográfica os elementos de forma e os processos existentes são interdependentes, ou seja, uma significativa alteração antrópica, ou natural, que venha a ocorrer em determinado ponto da bacia hidrográfica, reflete automaticamente um ajustamento do sistema de drenagem. (Tucci, 1997; Barbosa; Furrier, 2009).

As características físicas de uma bacia hidrográfica são elementos de grande importância para avaliação de seu comportamento hidrológico. Entende-se que o manejo integrado de bacias hidrográficas deve considerar, de forma interligada, os processos físicos da água e o ciclo hidrológico, bem como suas relações com outros estratos naturais, como solo, relevo, flora e fauna, juntamente com interesses dos múltiplos usos das fontes de água e uma gestão participativa em diferentes níveis administrativos (Machado, 2003)

Para melhor compreensão deste tipo de ecossistema algumas características devem ser analisadas, tais como: clima, geomorfologia, solo, vegetação, deflúvio e evapotranspiração, pois contribuirão para a quantificação do processo hidrológico da bacia. Uma vez estabelecidas as relações e comparações entre essas características e dados hidrológicos conhecidos, pode-se determinar indiretamente os valores hidrológicos em locais em que faltem dados (Antoneli; Thomaz, 2007; Santos et al., 2007). Teodoro et al. (2007) ressaltam que a análise de aspectos relacionados à drenagem, relevo e geologia, pode levar à elucidação e compreensão de diversas questões associadas à dinâmica ambiental local.

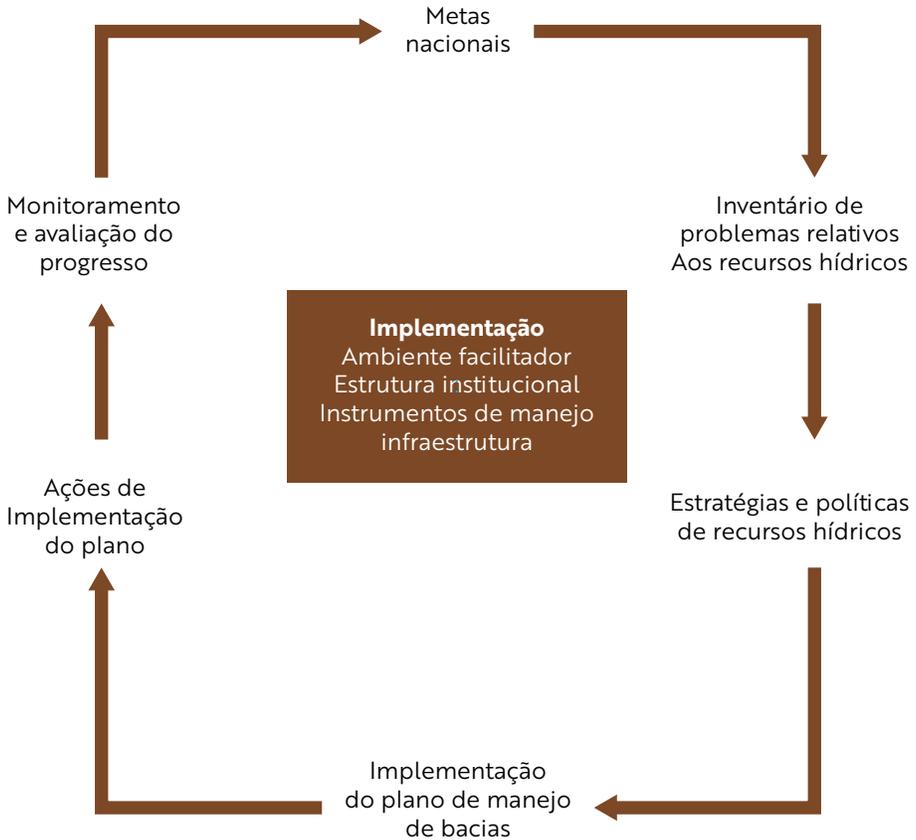
As estruturas dos ecossistemas da bacia estão interligadas entre materiais abióticos e bióticos presentes no meio ambiente. A análise integrada dos usos do solo e monitoramento da água no espaço (e.g. sub-bacias) e no tempo (e.g. estação seca e estação chuvosa) permite avaliar a possível degradação da qualidade da água inter-relacionada aos usos do solo e manejo do solo (Ding et al., 2016). O mapeamento do uso e cobertura da terra também pode ser relacionado com a dinâmica hidrológica e a emissão de poluentes, para identificar padrões de alteração na ordenação espacial. A partir dessas informações também é possível prever custos para a gestão dos recursos naturais, utilizando-a como sistema de apoio à decisão (Shao et al., 2017).

## Aplicação de modelagem e dos dados de monitoramento para a gestão de bacias

Como já dito anteriormente, a bacia hidrográfica é a unidade da gestão ambiental de recursos hídricos. A gestão integrada de recursos hídricos deve manejar recursos naturais e atividades humanas, analisando as necessidades dos ecossistemas, os aspectos econômicos e sociais dos recursos hídricos, levando em consideração que a interação entre tais elementos pode ocorrer de forma positiva ou negativa. A forma de manejar os recursos deve ser adaptativa, onde um plano é elaborado, implementado, monitorado e reportado, com reavaliações e atualizações conforme as necessidades. Importante para o sucesso da gestão de recursos hídricos é a integração entre diversos níveis de governança para estabelecimento de prioridades e tomada de decisão (Heathcote, 2009; Cetesb, 2021). A Política Nacional de Recursos Hídricos prevê os seguintes instrumentos para sua gestão: Planos (federais, estaduais, municipais, ou por bacia) de Recursos Hídricos; enquadramento dos corpos d'água em classes (orientado pelos usos preponderantes da água no trecho do rio); e outorga e cobrança pelo uso dos recursos hídricos. A Figura 13.1 ilustra a relação entre as fases do processo de gestão de recursos hídricos.

O monitoramento é fase essencial no desenvolvimento do plano de gestão de recursos hídricos. As técnicas de monitoramento abordadas neste capítulo permitem a obtenção e avaliação de diversos aspectos das bacias hidrográficas, de forma espacializada, através de dados espaciais e modelos derivados, e ao longo do tempo, séries de dados obtidas de monitoramento contínuo (Tabela 13.1). Essas entradas permitem avaliar a disponibilidade de recursos hídricos, sua qualidade bem como a saúde do meio ambiente aquático que, de forma agregada, contribuem para o objetivo da gestão ambiental de bacias. Diversas estratégias de intervenção poderão ser delineadas a partir do monitoramento: indicações para usos alternativos do solo (cultivos e criações mais apropriadas para as condições do solo); zoneamento do espaço (indicação aprimorada da localização das práticas ideais); boas práticas agropecuárias (curvas de nível, bacias de captação); limitações e indicações de outorga; derivação e tratamento de fluentes e campanhas de educação ambiental e treinamento técnico. Uma apresentação detalhada de técnicas de agricultura conservacionista com foco na gestão de recursos hídricos pode ser apreciada em Gomes; Pessoa (2010).

## Objetivos de desenvolvimento



**Figura 13.1.** Fases e componentes do processo de gestão integrada de recursos hídricos de uma bacia hidrográfica (baseado em UN-Water, 2007).

**Tabela 13.1.** Principais tipos de informações monitoradas e seu papel em um plano de gestão integrada de recursos hídricos (RH).

Natureza ou tipo de informação	Aspecto/âmbito espacial ou temporal	Utilidade na gestão de RH	Observações
Uso e cobertura do solo	- Bacia hidrográfica - Zonas ripárias - Informações anuais	- Fundamental para as fases de elaboração, execução, monitoramento. Fornece subsídios para a construção de cenários alternativos. - Ferramentas de SIG são essenciais para a comunicação de dados aos diversos atores envolvidos. - Participam também como elemento fundamental em diversos modelos hidrológicos	As informações são fortemente influenciadas pela resolução espacial dos dados, especialmente nas bacias de pequeno porte (entre 10 e 1000 ha)
Hidrologia (vazão fluvial)	- Bacias hidrográficas - Canal fluvial - Informações desde instantâneas, até diárias e mensais, constituindo séries históricas	- Fundamental para o conhecimento da disponibilidade de recursos passíveis de captação direta (do canal). - Séries históricas permitem caracterização hidrológica da bacia, possibilitando estimativas e comportamentos futuros em diferentes cenários. Variável estimada em diversos modelos hidrológicos. - Contribui e se integra aos demais processos e funções do ciclo hidrológico e do clima. Contribui e se beneficia do conhecimento climatológico, - Condiciona processos de outorga.	Em algumas regiões não há séries históricas de vazão disponíveis, o mesmo ocorre para a grande maioria de pequenas bacias hidrográficas. Neste caso, vazão poderá ser estimada por métodos indiretos.
Hidrobiogeoquímica	- Bacia hidrográfica - Canal fluvial - Informações diárias (ou instantâneas), constituindo séries históricas	- Permite conhecer o complexo de interações no sistema, integrando desde sua base geológica, climática, pedológica até dados sobre cobertura do solo, incluindo os tipos de usos antrópicos, incluindo dados históricos. - Principal aspecto orientador para o manejo adequado do solo, orientando práticas de conservação ou usos alternativos. - Permite enquadramento dos corpos d'água. - Orienta usos possíveis da água.	Da mesma forma que para a vazão fluvial, poucas bacias foram monitoradas por longo tempo, especialmente de médio e pequeno porte. Aqui, porém, não é possível estimar valores de concentração de elementos baseados em outras variáveis, como clima.
Fauna e flora aquática	- Bacia hidrográfica. - Canal fluvial. - Em geral informações mensais a anuais.	- Tem um caráter integrador da saúde ambiental do sistema da bacia e de processos do canal fluvial, pois a resposta biológica se dá em função de diversos parâmetros da qualidade ambiental, que devem ser suficientes para a manutenção da biota por, ao menos, um ano (ligado ao ciclo de vida das espécies). - Orienta enquadramento e discussões sobre qualidade da água. - Orienta determinação de vazão mínima ecológica e, também, outorga. - Componente muito relevante para ações de educação ambiental.	Seu uso depende de equipe treinada na coleta e identificação de organismos aquáticos, nem sempre disponíveis. Processamento de amostras pode ser demorado. Seu uso é muito estratégico para campanhas de educação ambiental, pois pode fornecer espécies-bandeira para campanhas de conservação.

## Pressupostos do monitoramento hidrobiogeoquímico

Para avaliar se determinado impacto que o uso da terra e/ou a atividade agropecuária promove sobre um trecho de rio, pode-se trabalhar com a abordagem de monitorar as características dos fluxos hídricos e biogeoquímicos (fluxos de água e de elementos químicos) a montante e a jusante da referida atividade. Uma das dificuldades, no entanto, para a geração de conhecimento confiável nesse tema relaciona-se à necessidade de que os estudos desenvolvidos sejam de médio a longo prazo, de maneira que a variabilidade entre os diferentes anos, mais secos ou chuvosos, possa ser contemplada. (Figueiredo; Green, 2019).

Atualmente, quando são aceleradas as mudanças no uso da terra, os desafios de relacionar os sistemas de produção agropecuária com os recursos hídricos no âmbito da bacia hidrográfica são grandes (Figueiredo; Green, 2019). Nesse contexto, torna-se ainda maior a complexidade de estudos sobre os ciclos de água, nutrientes e carbono, e suas relações com as entradas antropogênicas de agroquímicos, práticas de manejo agrícola e programas de conservação.

Em se tratando da observação da dinâmica de um ecossistema ou dos processos a ele vinculados é necessário, antes de se iniciar uma ação de monitoramento, que o ambiente seja devidamente caracterizado, para que seja possível responder: Quais parâmetros monitorar? Quando e com que frequência monitorar? Como realizar as amostragens e medições?

Um mesmo tipo de monitoramento pode não ser adequado para todos os locais e situações agroambientais, assim como também os parâmetros a serem medidos e a frequência com o qual é realizado. Nesse sentido Fidalgo et al. (2017) propõem uma série de indicadores de qualidade ambiental e suas respectivas frequências e intensidades amostrais. Independente da frequência escolhida para o monitoramento é fundamental estabelecer-se uma linha de base, isto é, fazer o marco zero da amostragem, ou da coleta de dados, antes que ocorram intervenções na microbacia, – podemos assim por dizer de um diagnóstico. Outra possibilidade é a utilização de uma bacia pareada com a finalidade de comparação de uma condição parecida com a da situação de mudança de ocupação e uso do solo a ser avaliada.

Respondidas as três questões iniciais, o monitoramento dos fluxos fluviais pode ser realizado não apenas através de campanhas eventuais para coleta de dados (semanalmente, quinzenalmente, mensalmente e outros), mas também por meio de equipamentos automáticos instalados no campo para coletas de amostras e medições registradas continuamente em *dataloggers*, ou coletores de dados. (Fidalgo et al. 2017; Figueiredo; Green, 2019).

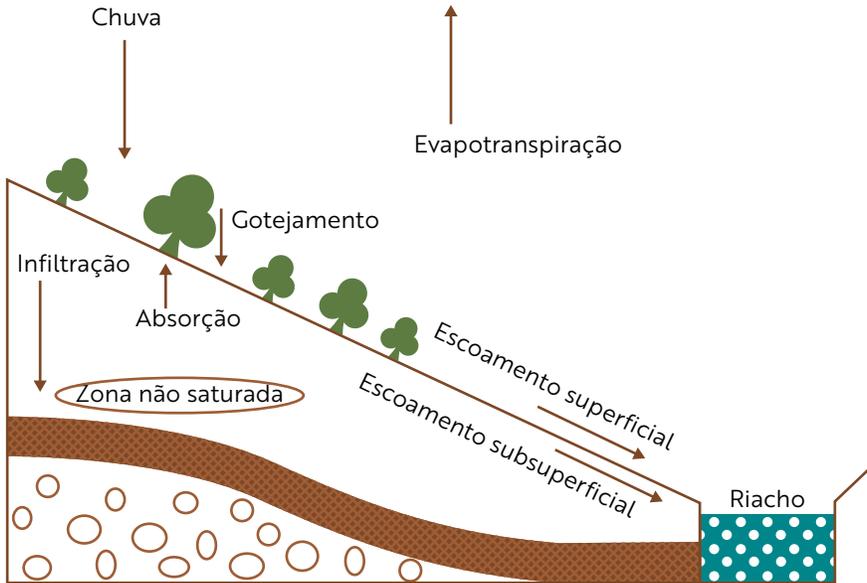
Uma vez que as mudanças no uso da terra, acoplada às diferentes taxas de pluviosidade, poderão promover alterações substanciais na hidrobiogeoquímica fluvial e,

por conseguinte, na qualidade da água disponível para os múltiplos usos que a sociedade faz do corpo d'água nas bacias (Solbé, 1986), e que a produção agrícola apresenta sazonalidade em suas práticas (aração, gradagem, adubação, combate fitossanitário e outras práticas), um plano de ações de monitoramento deve ser pensado em diferentes escalas temporais e espaciais. Alguns estudos costumam dividir o monitoramento como básico e avançado, porém tal divisão pode não ser muito adequada. De um modo geral, o monitoramento básico se utiliza de métodos e instrumental mais simples, em escala de tempo de menor frequência. Um exemplo disso seria monitorar manualmente a vazão (quantidade de água) ou química fluvial (qualidade da água) em um curso d'água apenas uma vez a cada estação do ano. Já o monitoramento avançado consistiria em se monitorar (automaticamente) os mesmos parâmetros com maior frequência. Desta maneira podemos estabelecer a questão da temporalidade.

Já no âmbito da variação espacial, deve ser levando em consideração o alcance dos resultados para saber até onde podem ser extrapolados. Isso ajuda na interpretação dos resultados e no estabelecimento de relações. O resultado obtido no monitoramento de um ponto da microbacia em muitas das vezes não pode ser relacionado com outros pontos da mesma área, bem como monitorar o exutório de uma bacia e tentar estabelecer relações com uma determinada propriedade rural é deveras temerário. Abordagens que considerem a definição de pontos de amostragem em trechos fluviais a montante e a jusante de determina condição de uso da terra que se deseje avaliar é uma das saídas para solucionar essa questão. Uma outra possibilidade é a adoção de comparação de bacias pareadas aqui já mencionada.

Ressalta-se que as consequências dos processos hidrossedimentológicos que ocorrem nas microbacias trazem alterações para os cursos e corpos d'água que se encontram em áreas a jusante afetando, dessa forma, reservatórios que possuem uso múltiplo, tanto nas áreas rurais quanto urbanas. Sabe-se, no entanto, que em estudos desses processos, as microbacias onde encontram-se apenas rios de primeira e segunda ordem são os mais recomendáveis.

Além disso, é em uma microbacia que pode-se avaliar com maior precisão os diferentes caminhos hidrológicos, a saber: a água da chuva atinge a superfície terrestre da bacia e, como consequência, uma pequena parte da água é retida pela vegetação enquanto que a outra parte atinge o solo; no solo a água se infiltra podendo ser absorvida pelas raízes das plantas, ou seguir em fluxo sub-superficial para as áreas mais baixas ou ainda alcançar a zona saturada do solo formando o lençol freático, cujo estoque hídrico supre os cursos d'água nos períodos de estiagem; por outro lado, a água que não infiltra ou evapora pode formar o escoamento superficial até atingir o leito do rio (Figura 13.2).



**Figura 13.2.** Esquema gráfico de como funcionam os fluxos hídricos em uma microbacia hidrográfica.  
Fonte: (Figueiredo; Green, 2019).

Figueiredo; Green (2019) apontam que uma avaliação da sustentabilidade na agricultura deve atender à conservação dos atributos hídricos de qualidade e quantidade de uma bacia no tocante à quatro aspectos: (1) a complexidade dos processos naturais em diferentes escalas no espaço e no tempo na bacia; (2) os desafios inerentes ao próprio manejo sustentável da bacia em seus aspectos técnicos e socioeconômicos; (3) a necessidade indispensável de medições confiáveis e simulações dos fluxos hídricos na bacia; (4) a intensidade com que as mudanças projetadas do clima e do uso da terra podem afetar a sustentabilidade no futuro.

## Pressupostos do uso bioindicadores de qualidade ambiental

Os ecossistemas lóticos são caracterizados por uma grande variabilidade e complexidade de parâmetros bióticos e abióticos, tornando-os essencialmente dinâmicos. Um determinado rio ou uma seção do mesmo não é um sistema isolado, pois são ecossistemas abertos com dinâmica de importação e exportação de nutrientes, energia e água. Tudo o que entrar em seu trecho superior irá afetar seu trecho inferior. Por isso, como já comentado anteriormente, em monitoramento da qualidade da água, deve-se atentar para a seção de rio estudada, pois as diferenças naturais ao longo do

gradiente longitudinal das bacias não podem se confundir com impactos de origem antrópica. Tais impactos podem também comprometer a saúde dos ecossistemas aquáticos (Allan, 2004) e, conseqüentemente, causar perda de diversidade biológica (Silveira, 2001; Benstead et al., 2003) e alterações na estrutura de sua comunidade (Dirzo et al., 2014).

A fauna de águas doces é diversa, e um importante grupo representante é o dos macroinvertebrados bentônicos. Trata-se de animais como insetos, moluscos, crustáceos e vermes, que vivem associados ao sedimento de fundo de rios, lagos e lagoas. São aproximadamente maiores que 0,5 mm, e em geral se situam numa posição intermediária na cadeia alimentar. Podem se alimentar de algas, microrganismos, detritos orgânicos, e invertebrados menores. Os peixes (e outros vertebrados) são seus principais predadores. Outra importante característica é que são organismos sedentários, sésseis ou pouco móveis. Por esses e outros motivos, os macroinvertebrados são amplamente usados para avaliar a base de presas disponíveis para a manutenção das populações de peixes e principalmente para avaliar a qualidade da água (Karr, 1991).

Por apresentarem modo de vida de baixa motilidade, os macroinvertebrados sofrem as conseqüências das atividades no entorno, já que o sedimento é o ponto final de grande parte da carga poluidora que atinge o ambiente aquático (Cetesb, 2021). Essa característica lhes confere uma vantagem sobre a utilização de variáveis físico-químicas de qualidade de água para monitoramento, pois por permanecerem mais tempo no local a ser avaliado, são testemunhas de um maior período de tempo onde possam ocorrer impactos. São considerados bioindicadores pois, em determinadas condições ambientais, os grupos mais resistentes podem se tornar dominantes, enquanto os mais sensíveis podem se tornar raros ou ausentes (Brigante et al., 2003; Monteles et al., 2021). A estrutura dessa comunidade pode ser influenciada por variáveis em escalas espaciais, temporais, regionais e pelas interações das variáveis bióticas e abióticas, e qualquer alteração de um desses fatores pode interferir na composição e distribuição dos organismos bentônicos (Weigel et al., 2003). Dessa forma, estudos que abrangem tal comunidade podem fornecer dados relevantes para uma diagnose da qualidade ambiental de corpos hídricos.

Para análise da qualidade da água podem também ser usadas diversas métricas e análises estatísticas com a comunidade macrobentônica. Dentre elas, podemos destacar a riqueza funcional que em geral apresenta respostas mais robustas, sem desprezar porém os índices de diversidade e equitabilidade, a riqueza taxonômica, análises de agrupamento e índices bióticos. Também são usadas taxas, como a razão entre grupos sensíveis e tolerantes; um exemplo é a razão EPT (número de indivíduos coletados das ordens *Ephemeroptera*, *Plecoptera* e *Trichoptera*) e *Chironomidae* (número de indivíduos da família *Chironomidae*) (Sonoda et al., 2009; Sonoda et al., 2018a). No caso dos índices bióticos, eles possuem a vantagem de não requerer um nível taxonômico

de identificação muito baixo (como gênero ou espécie), além de serem em geral qualitativos, diminuindo o esforço amostral.

Na literatura também se encontra a proposição de índices multimétricos, que incluem vários atributos biológicos das comunidades de macroinvertebrados (Hughes et al., 1998; Martins et al., 2020) e conseguem discriminar os efeitos de diferentes tipos de estresse e impactos (Usepa, 2016). Embora a legislação brasileira ainda não inclua o biomonitoramento com macroinvertebrados bentônicos nos relatórios de avaliação da qualidade das águas doces, a Cetesb, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, já o utiliza há vários anos em seus relatórios de águas para abastecimento (Cetesb, 2021).

## AÇÕES DE PESQUISA NA EMBRAPA MEIO AMBIENTE

A Embrapa Meio Ambiente realizou diversas ações de pesquisa envolvendo o monitoramento de bacias hidrográficas em parceria com outros grupos de pesquisa da própria Embrapa e de outras instituições de pesquisa e ensino. Relatamos a seguir alguma dessas ações.

### Monitoramento de bacias em diferentes biomas

O Projeto Componente 3, realizado no âmbito da Rede de Pesquisa AgroHidro, proporcionou a instrumentalização parcial de bacias hidrográficas experimentais para fins de monitoramento e caracterização dos recursos hídricos em diferentes biomas brasileiros (Rodrigues et al., 2016). Seu desenvolvimento fomentou estudos em recursos hídricos por parte de pesquisadores da Embrapa e seus parceiros externos, como universidades e outras instituições de pesquisa, assim como o intercâmbio de informações, principalmente no que se refere ao entendimento das relações dos recursos hídricos com o uso e manejo das terras.

Os resultados gerados nessa iniciativa de rede de pesquisa estão associados ao aperfeiçoamento de metodologias científicas, instrumentação de bacias hidrográficas, e diagnóstico da situação dos recursos hídricos em relação ao uso da terra em bacias no Brasil. Além disso, obteve-se a identificação de indicadores quali-quantitativos e base de dados primários de 20 bacias hidrográficas, e duas sínteses que apresentam diagnósticos de parte dessas bacias. Tais resultados fornecem subsídios ao planejamento do manejo conservacionista das terras, com o objetivo de assegurar água em quantidade e qualidade adequadas para a agricultura e demais atividades humanas, considerando as fragilidades, peculiaridades e potencialidades de cada bioma brasileiro. Esses resultados aplicam-se também em avaliações de serviços ambientais e na

otimização do monitoramento da água nas áreas estudadas, bem como em áreas com características similares (Prado et al. 2017).

No bioma Amazônia, em monitoramento conduzido na Amazônia Oriental, a mudança progressiva da paisagem no Estado do Pará resultou em áreas degradadas e retração dos remanescentes florestais, reflexo do uso inadequado e da ocupação desordenada, incluindo a implementação de áreas de cultivos agrícolas. Observou-se maiores impactos na qualidade da água nas cabeceiras das bacias hidrográficas e nas zonas de recarga dos aquíferos. Em virtude da grande fragilidade desses locais, sua recomposição florestal é urgente, tanto no âmbito da propriedade rural quanto da bacia (Figueiredo, 2014).

No Centro-Oeste brasileiro foram organizados dados de qualidade de água de bacias, que drenam para o Cerrado e para tributários das áreas alagadas do Pantanal, para avaliar o estado ecológico e o nível de impacto, além do desenvolvimento de recomendações para melhoria do monitoramento do sistema fluvial Cerrado-Pantanal. Constatou-se que a intensificação do uso agrícola nas porções superiores das bacias resulta em concentrações maiores de nitrogênio em córregos e até no rio Paraguai, quando considerado o período de 1995 a 2009. A partir desse diagnóstico foi realizada recomendação para que as instituições responsáveis pelo monitoramento hidrológico aumentem a frequência das amostragens nas bacias contempladas pelo estudo (Zeilhoffer et al., 2016).

No Bioma Mata Atlântica, na bacia do Ribeirão da Onça, localizada no Primeiro Planalto Paranaense, situada em zona rural porém próxima a um grande centro urbano, foram investigadas em quais áreas seria mais urgente a restauração da floresta ciliar nas Áreas de Preservação Permanente (APPs). Os resultados indicaram que, em 51% da área da bacia não há conflito de uso das APPs. Por outro lado, para os 49% restantes, em 40%, o impacto é classificado como sendo médio, em 8% como sendo alto e, em 1%, o impacto é considerado baixo. As áreas de alto impacto e médio impacto foram então apontadas como prioritárias para recuperação das APPs. Ficou demonstrado nessa pesquisa a eficiência da utilização de ferramentas intrínsecas ao Sistema de Informações Geográficas (SIG) em análises desse tipo (Fritzons; Mantovani, 2017).

No sudeste brasileiro, também no Bioma Mata Atlântica, foi avaliada a Bacia do Rio Jaguari, que ocupa uma área total de 3.290 km<sup>2</sup> nos estados de Minas Gerais e São Paulo e contribui tanto para o Rio Piracicaba, importante tributário do rio Tietê, como para o Sistema Cantareira, cujos reservatórios atendem o abastecimento hídrico na região, incluindo a área metropolitana da cidade de São Paulo. Nessa bacia foram definidas onze estações de amostragem no próprio rio Jaguari e oito estações no seu principal afluente, o rio Camanducaia. Observou-se um efeito evidente do uso da terra nos diferentes trechos dos rios estudados, sendo que os trechos com a maior proporção de vegetação florestal original ou de uso agrícola de baixo impacto ambiental

apresentaram uma melhor qualidade da água comparando-se com o setor da bacia mais urbanizado. O impacto do esgoto urbano tem provocado queda na qualidade da água, fator evidenciado pelas concentrações do carbono (Costa, 2018). No contexto da bacia do Jaguari observa-se que, embora o desmatamento e a ocupação agrícola contribuam para alterações substanciais na hidrobiogeoquímica fluvial, o impacto das áreas urbanas é muito mais preocupante.

Ainda no Bioma Mata Atlântica, desta vez no nordeste brasileiro, estudou-se o caso da bacia do rio Siriri, uma das principais contribuintes do Rio Japarutuba, localizado no estado de Sergipe. Trata-se de bacia com alterações significativas nos recursos hídricos, com processos erosivos importantes, assoreamento dos leitos dos rios, poluição hídrica e modificações nos regimes hidrológicos. Foi diagnosticado que a origem desses impactos está diretamente relacionada às intensas alterações no uso e cobertura da terra, com retiradas significativas das florestas ciliares e substituição de pastagens por cultivos agrícolas, além de deficiente coleta de esgotos domésticos nos centros urbanos. Alguns parâmetros de qualidade de água apresentaram indicativos desses impactos, como valores de oxigênio dissolvido abaixo do limite mínimo estabelecido para a Classe 2 da Resolução do Conama 357/2005, provavelmente devido ao uso inadequado de fertilizantes agrícolas e ao lançamento de esgoto urbano no rio, sem o seu devido tratamento, fato este que em geral ocasiona ainda mais impactos sobre a qualidade da água do que o desmatamento e a adoção de práticas agrícolas inadequadas (Gonçalves et al., 2016).

Por fim, cada bioma ou ecorregião possui bacias cujas características apontam para maiores cuidados sejam eles na qualidade ou na quantidade de água. Obviamente, a Amazônia precisa de maior atenção no tocante a qualidade, enquanto no semiárido brasileiro a quantidade é o fator de maior preocupação. Aspectos ambientais são diferentes, assim como a vocação agrícola, nas diferentes bacias brasileiras. Generalidades não são recomendadas em diagnósticos dessa natureza. Tem-se aqui apenas alguns exemplos dos diversos estudos realizados pela Rede AgroHidro, cujos resultados das pesquisas confirmam a importância do setor rural para a conservação dos recursos hídricos nas bacias, os quais são indispensáveis para as demandas não apenas da agricultura, mas também das áreas urbanas e industriais do país.

## Monitoramento da Porção Superior da Bacia do Rio Jaguari

Em pequenos cursos d'água de sub-bacias localizadas na Serra da Mantiqueira, no Estado de Minas Gerais, e que correspondem as áreas de cabeceira das dos rios Camanducaia e Jaguari, foram avaliadas possíveis alterações na hidrobiogeoquímica e na biota aquática, assim como a presença de agrotóxicos. Considerou-se nessas avaliações a dinâmica de mudanças do uso da terra, com destaque para o uso agrope-

cuário, com o objetivo de fornecer um maior embasamento para o desenvolvimento rural no sul de Minas Gerais. A abordagem adotada nesta pesquisa levou em conta que o estudo da qualidade e quantidade da água fluvial em microbacias hidrográficas (<1.000 ha) é uma ferramenta de grande utilidade para avaliar-se as condições de sustentabilidade das atividades produtivas no meio rural.

Como resultados do monitoramento adotado, Figueiredo et al. (2020) revelaram que: (a) as pastagens promoveram aumento das concentrações de íons maiores ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ ), carbono dissolvido e sedimentos nos cursos d'água estudados; (b) a recuperação florestal iniciada em uma das sub-bacias não refletiu em melhoria substancial na qualidade da água, uma vez que os pastos ainda predominam na paisagem; (c) a agricultura e a silvicultura promoveram aumento das concentrações de íons menores de nitrogênio e fósforo ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{PO}_4^{3-}$ ); (d) a floresta exerceu papel importante na dinâmica do carbono no material dissolvido presente nesses cursos d'água; e (e) a floresta ripária se apresentou como fator decisivo para a qualidade da água fluvial.

Quanto à avaliação dos efeitos do uso da terra sobre os macroinvertebrados aquáticos definiu-se a realização de coletas nos dois períodos climáticos predominantes na região, estação chuvosa e estiagem, classificando-se as bacias em três classes de conservação: uma mais conservada, uma em processo de recuperação florestal e outra mais degradada. Na estação chuvosa, a microbacia mais conservada apresentou características de uma comunidade em maior equilíbrio: um maior número de táxons dominando o sistema; uma maior participação de assembleias de *Ephemeroptera*, *Plecoptera* e *Trichoptera* (EPT), as quais tem papel importante na ciclagem de nutrientes (Sonoda, 2010a); e transferência de energia, uma baixa participação de táxons resistentes. Por outro lado, os grupos funcionais de alimentação (FFG - *Functional Feeding Groups*) tiveram distribuição bastante semelhante nas três microbacias, porém houve participação significativamente maior de picadores na microbacia conservada. Nesta época de águas altas, a microbacia em processo de recuperação apresentou-se discretamente melhor que aquela degradada, provavelmente em decorrência do efeito benéfico conferido pelas práticas ambientais conservacionistas (Sonoda et al., 2011). Entretanto, ambas apresentaram quantidade semelhante de famílias dominantes, porém com expressiva dominância de *Chironomidae* (65,1%) na microbacia degradada, baixa participação de EPT (menor na microbacia degradada), baixa participação de picadores, sendo metade do encontrado no local conservado. Em relação aos FFG, as guildas apresentaram participação muito semelhantes.

Os picadores são ótimos indicadores de preservação da vegetação, assim, alta quantidade dos mesmos na comunidade aponta a elevada qualidade ambiental (Iñiguez-Armijos et al., 2016, Saulino, Trivinho-Strixino; 2018, Sonoda et al., 2018b). Já as ordens *Ephemeroptera*, *Plecoptera* e *Trichoptera* (EPT) são reconhecidas mundialmen-

te pelo alto grau de sensibilidade (Matsuzaki, 2011; Meza-S et al., 2012; Conroy et al., 2016), sendo altamente exigentes quanto aos requisitos ambientais.

Na estiagem todas as microbacias tiveram seus indicadores ainda mais salientados que na época de chuvas. Na microbacia conservada, houve maior número de famílias dominando a comunidade, EPT aumentaram significativamente sua participação, chegando a duplicar seu numeral participativo, houve melhor distribuição de participação dentre os grupos funcionais de alimentação e a participação de picadores foi muito mais pronunciada que na época chuvosa (dobrando o valor numérico), fato também observado em estudos em outros biomas brasileiros (Sonoda, 2010b). Em relação às outras duas microbacias, essa época de escassez de chuva pronunciou a diferença entre suas comunidades, apesar de ainda manterem padrões similares, contou-se com diminuição significativa da porcentagem de EPT e concentração dos recursos alimentares em uma das guildas, os filtradores. Nessas microbacias, os picadores além de apresentarem baixas participações nas duas estações climáticas, foram registrados em concentrações semelhantes nas duas microbacias, diminuindo mais de três vezes a sua presença durante a estiagem.

Os resultados obtidos indicam que os macroinvertebrados responderam satisfatoriamente como indicadores de qualidade ambiental, sendo *Perlidae* (Plecoptera) selecionado como indicador de alta qualidade e *Hirudinea* (Anelida) de baixa qualidade. Ou seja, em atividades de restauração de APP, a constatação da presença de *Perlidae* no ambiente aquático indicará que a finalidade da recuperação ambiental foi obtida. Por outro lado, o aparecimento de *Hirudinea* indica que a degradação está avançando.

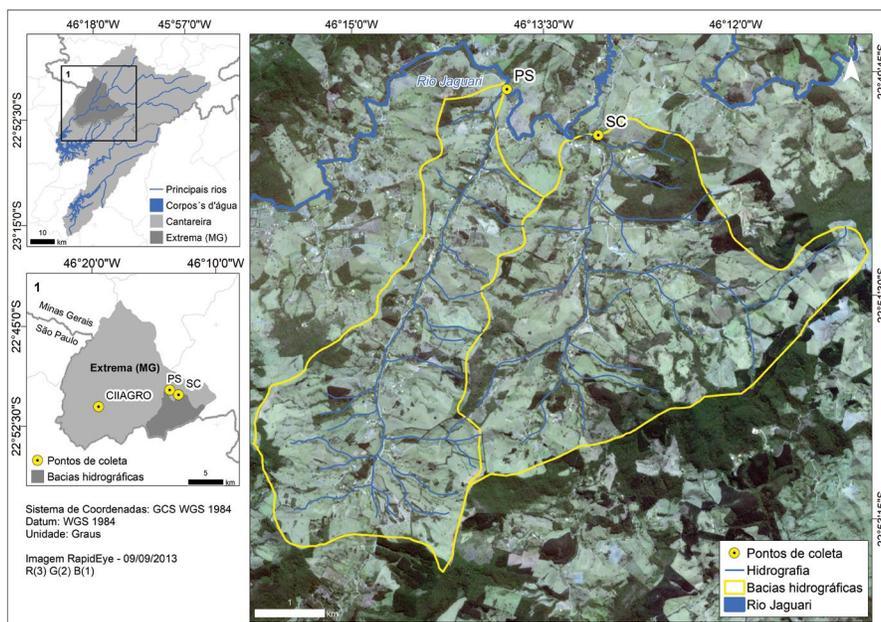
Alguns desdobramentos derivados desse projeto incluem a articulação de proposta de educação ambiental em parceria com a Secretaria de Meio Ambiente do Município de Extrema, com finalidade de ensinar aos estudantes de educação básica sobre o funcionamento das bacias hidrográficas, o papel dos insetos aquáticos, sua importância e uso como indicadores.

Adicionalmente nessas áreas de cabeceira das bacias do Jaguari, foi realizado estudo em 12 trechos fluviais no rio Camanducaia e seus tributários na porção superior dessa sub-bacia. O referido monitoramento foi realizado durante a estação chuvosa e contemplou a análise sobre a possível presença de 46 pesticidas. Os resultados apontaram detecção de sete pesticidas: fipronil, methyl parathion, metolachlor, atrazina, carbofuran, diuron, e simazina. Apenas a atrazina e o diuron apresentaram concentrações acima do limite de quantificação do método analítico ( $0,32 \mu\text{g L}^{-1}$  para a atrazina, e  $0,57 \mu\text{g L}^{-1}$  para o diuron). As frequências na detecção de pesticidas nas águas fluviais avaliadas foram maiores do que as esperadas para bacia com apenas 11,8% de área agrícola. A vulnerabilidade da bacia do Camanducaia à contaminação de pesticidas pode ser atribuída a elevada precipitação pluvial anual ( $> 1.500 \text{ mm ano}^{-1}$  em sua porção superior), associada ao seu relevo com vertentes acentuadas e tipos de solos

que favorecem o escoamento superficial, agravado por práticas deficientes no manejo dos solos. (Barizon et al. 2020).

## Serviços Ambientais na Porção Superior da Bacia do Rio Jaguari

Com o objetivo de entender alterações nas ofertas dos serviços ecossistêmicos em bacias hidrográficas, foram monitoradas duas bacias, contempladas pelo programa municipal de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), em Extrema, MG. As bacias hidrográficas avaliadas foram as do Ribeirão das Posses (PS) e de Salto de Cima (SC), com áreas de 1200 ha e 1500 ha, respectivamente. Trata-se de microbacias que contribuem para o Rio Jaguari e, conseqüentemente, para as represas integrantes do Sistema Cantareira, que abastece grande parte da população no estado de São Paulo (Figura 13.3).



**Figura 13.3.** Mapa de localização das bacias do Ribeirão das Posses e do Salto de Cima, Extrema, MG. Fonte: Figueiredo et al., (2021).

Foram realizadas análises quantitativas e qualitativas sobre os recursos fluviais e perdas de água e de solo (sedimentos) nessas bacias. No período de janeiro a de-

zembro de 2017, a cada duas semanas, parâmetros químico-físicos (temperatura, pH, oxigênio dissolvido e condutividade) eram monitorados em um ponto de coleta na foz dos ribeirões das Posses e Salto de Cima, assim como amostras fluviais eram coletadas para determinação de total de sedimentos em suspensão (TSS), cátions, ânions, nitrogênio total e dissolvido total (NT e NDT) e carbono orgânico e inorgânico dissolvido (COD e CID).

De todas as variáveis observadas ao longo do tempo e entre as bacias adjacentes, Figueiredo et al. (2020) apontaram como expressivos, alguns aumentos pontuais (picos) de condutividade elétrica e concentrações de cátions maiores ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , e  $\text{Mg}^{2+}$ ) na microbacia PS e de ânions maiores ( $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ ) na microbacia SC. Segundo os autores, esses incrementos eventuais e aleatórios sugerem a existência de fontes pontuais de poluição próximos a foz dos ribeirões dessas microbacias. Também encontraram acréscimos em determinados meses, em ambos os ribeirões, nas concentrações de amônio, um indicativo de entradas pontuais de fezes/urina de bovinos e esgoto urbano/industrial.

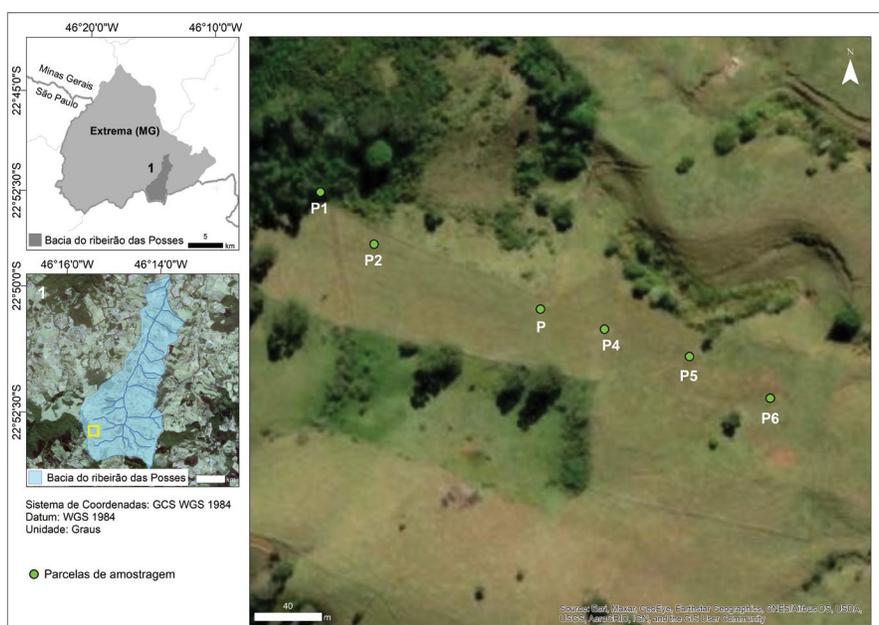
Os autores concluem que embora tenha sido observada uma certa melhora na qualidade das águas superficiais nos ribeirões das microbacias hidrográficas de Posses e Salto de Cima, em resposta à recomposição florestal, as entradas pontuais de poluentes antrópicos são preocupantes e deveriam ser consideradas, assim como outras práticas de gestão, na condução de melhorias no âmbito do Programa de Pagamento por Serviços Ambientais em Extrema. Os dados e as análises fornecidos por Figueiredo et al. (2020) fornecem uma linha de base e um consistente banco de dados sobre os efeitos acumulativos da poluição difusa, resultante da agropecuária, e pelos esgotos pontuais que afetam a qualidade da água em bacias hidrográficas de cabeceira. Concluiu-se que a recuperação ambiental executada por meio do manejo da propriedade rural onde ocorrem as nascentes, com apoio da política pública municipal vigente, tem o potencial de contribuir para a melhoria dos recursos hídricos relacionados (Figueiredo, 2020).

Adicionalmente foi realizado um exercício de modelagem da Bacia do Ribeirão das Posses usando dados observados e dados da simulação de respostas hidrológicas. O modelo *Agricultural Ecosystem Services* (AgES) foi aplicado para simular a variação no armazenamento e movimento da água na bacia (Cruz et al., 2017). O período de simulação (2009–2014) foi definido em função dos dados disponíveis de vazão e de clima no período visando calibrar e testar o modelo. O modelo após calibrado mostrou-se eficiente para ser utilizado na estimativa de vazões durante períodos com dados ausentes como também para considerar cenários de mudanças de uso da terra sobre a quantidade e qualidade da água. Essas informações poderão então ser usadas em programas de pagamentos por serviços ambientais.

Os estudos de perdas de água e de solo (sedimentos) foram realizados no período compreendido entre maio e dezembro de 2016 na margem esquerda do Ribeirão das

Posses (Gomes et al., 2021), próximo à sua nascente principal (Figura 13.4). As amostragens foram realizadas em uma topossequência que contemplou dois tipos de cobertura vegetal (floresta nativa e pastagem), em diferentes tipos de solo destacando-se os Cambissolos Húmicos (CHE e CHd), como também Argissolos Câmbicos e Neossolos Litólicos, de acordo com Santos et al. (2018). Nessa topossequência, com declividade variável entre 19% e 55%, a cobertura de mata nativa correspondeu a 10% da área e o restante, 90%, correspondeu à pastagem.

A avaliação das perdas de água e de sedimentos por escoamento superficial, em função da cobertura vegetal, mostrou que sob a mata (solo CHE) essas perdas são muito inferiores quando comparadas com a cobertura de pastagem (sob CHd, Argissolos e Neossolos). A exceção é o solo CHd, que apresenta pouca diferença em relação ao CHE, particularmente em relação às perdas de água, cujos valores correspondem a  $392,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  e  $380,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . Para os sedimentos, os valores de perdas apresentam diferenças maiores, com  $4,7 \text{ kg ha}^{-1}$  para o CHE e  $7,1 \text{ kg ha}^{-1}$  para o CHd, ficando evidente a ação protetora da mata em relação ao transporte de sedimentos.



**Figura 13.4** - Topossequência em dois tipos de cobertura vegetal (floresta nativa e pastagem) na margem esquerda do Ribeirão das Posses.

Fonte: Adaptado de Gomes et al., (2021).

Por sua vez, os Argissolos e os Neossolos, sob pastagem, perderam em média, 473,6 e 924,6 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de água e 14,7 e 21,7 kg ha<sup>-1</sup> de solo, respectivamente. Os autores concluem, desta forma, que diferentes solos sob a mesma cobertura vegetal apresentam valores distintos de perdas de água e de sedimentos. Assim, é necessário que o proprietário rural faça uma divisão da área e estabeleça os diferentes usos de acordo com a capacidade de uso do solo, o que irá contribuir para a sustentabilidade da propriedade, tornando-a mais produtiva e ambientalmente mais equilibrada.

Frente a esse cenário de perdas, se o solo for bem manejado por meio dos serviços ambientais, pode-se atuar naturalmente na provisão dos serviços ecossistêmicos como “reservatório e filtro de água” para que assim ocorra a absorção e o armazenamento de água e de nutrientes, permitindo o desenvolvimento vegetal, o controle da erosão, do assoreamento e das enchentes (GOMES et al., 2021).

## Serviços Ambientais na Porção Inferior da Bacia do Rio Jaguari

A bacia do rio Jaguari ocupa áreas dos estados de São Paulo e Minas Gerais, compondo parte da bacia do Rio Piracicaba, que por sua vez é gerenciada pelo Comitê das Bacias PCJ (Piracicaba, Capivari e Jundiá). A bacia do Piracicaba abriga o maior complexo industrial do país com grande demanda de recursos hídricos, incluindo usos domésticos e agrícolas. Na porção superior dessa bacia situa-se o Sistema Cantareira, já citado nesse capítulo.

A sub-bacia do rio Jaguari, por sua vez, contém a represa Jaguari-Jacareí, a maior entre todas que compõem o Sistema Cantareira, e abastece com 53% da água que o sistema envia para a RMSP (Região Metropolitana de São Paulo), com 10 milhões de habitantes dependentes da água enviada por esse sistema de represas. Essa sub-bacia possui aproximadamente 2.196 km<sup>2</sup>. A área antropizada da sub-bacia do rio Jaguari, segundo levantamento realizado com a iniciativa da *The Nature Conservancy* do Brasil (TNC), é de 80% e escoia a montante e a jusante da represa Jaguari-Jacareí, respectivamente 95.369,9 e 71.877,9 t ano<sup>-1</sup> de sedimentos.

Com o objetivo de apresentar proposta de melhoria da qualidade e quantidade da água nas bacias hidrográficas e criar um modelo de gestão de infraestrutura verde, a TNC realizou levantamentos e estudos na área da sub-bacia do rio Jaguari para a construção do Plano de Negócios (Bacia do Jaguari: plano de negócios). O projeto é estruturado em duas fases: primeiro demonstrar a viabilidade de investimentos em infraestrutura verde e então elaborar projeto para conservação, recuperação de vegetação ciliar e conservação do solo em áreas produtivas como um projeto piloto, em execução no município de Jaguariúna (2013 – atual), para em seguida ampliar a escala dos resultados para outros municípios situados a jusante da barragem Jaguari-Jacareí do sistema Cantareira (The Nature Conservancy, 2014).

As premissas desse modelo de investimento em infraestrutura verde se baseiam nos benefícios que podem ser alcançados como regulação hídrica, alto impacto econômico, redução de enchentes, custos de tratamento de água reduzidos, redução no assoreamento e remoção de nutrientes. Para tanto procedeu-se com uma modelagem matemática para estimar a produção de sedimentos na área da bacia do rio Jaguari utilizando variáveis de solos, chuvas, topometria e outras informações geopedológicas (The Nature Conservancy, 2014).

A análise da produção de sedimentos foi realizada para a bacia do rio Jaguari com base na suscetibilidade geopedológica e no uso e cobertura das terras gerando dois cenários. O primeiro cenário, com as estimativas da realidade da cobertura vegetal da época, e um segundo cenário, hipotético, com as ações de restauração e práticas de conservação de solo que se pretendia implementar, segundo Paula et al. (2021).

Na gestão do programa de pagamentos por serviços ambientais (PSA) implementado pela prefeitura de Jaguariúna/SP, coube à Embrapa Meio Ambiente a supervisão e orientação de um monitoramento hidrológico, em área piloto para avaliar o progresso na melhoria dos recursos hídricos em resposta às ações de conservação e recuperação ambiental adotadas. Esse monitoramento tem sido realizado por meio de coletas de amostras de água e medições mensais em campo, realizadas a partir de agosto de 2016, com breves interrupções até o presente momento, assim como a realização de análises laboratoriais, tabulação e interpretação de dados, seguidas de uma avaliação geral do programa em relação a estas observações, junto ao grupo gestor do programa de PSA; com atenção para a melhoria da qualidade e quantidade de água.

Resultados preliminares mostrados em seminário público na Embrapa Meio Ambiente, em novembro de 2018, apontam para as seguintes tendências relativas ao monitoramento realizado até então:

1. a temperatura da água ( $T_{\text{água}}$ ) diminui com o prosseguimento das práticas de recuperação com exceção de trecho de córrego afetado por práticas inadequadas de manejo de propriedade rural, confirmando ser  $T_{\text{água}}$  um bom indicador para PSA;
2. aumento de oxigênio dissolvido (OD) na medida em que as práticas de recuperação ocorrem na maioria dos pontos de monitoramento, indicando ser também OD um bom indicador, apesar de sua medição ser mais difícil e onerosa realização comparado a  $T_{\text{água}}$ ;
3. as concentrações de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) diminuem em todos os pontos de amostragem na medida em que as práticas de recuperação ocorrem, refletindo possível absorção de nitrogênio pelas mudas plantadas na área ripária;
4. aumento de carbono orgânico dissolvido (COD) em todas os pontos a medida que as práticas de recuperação prosseguem, indicando que o plantio de ár-

- vores nos solos das zonas ribeirinhas pode estar contribuindo com matéria orgânica dissolvida para o riacho;
5. aumento de sedimentos na água fluvial ocorreram em resposta ao aumento da vazão, medidas ao longo de dias específicos monitorados com equipamento automático;
  6. as respostas às práticas de manejo para recuperação podem demorar mais de cinco anos, de forma que os parâmetros avaliados devem ser monitorados por longo período, isso também devido à variabilidade climática anual.

### Monitoramento de Microbacias Agrícolas sob Sistemas de Plantio Direto

Quedas na qualidade da água e do solo também podem ocorrer onde sistemas de plantio direto (SPD) são adotados. Em geral, tal fato está associado ao manejo inadequado do solo somado à baixa eficiência de políticas públicas que redundem em menores taxas de erosão dos solos nas propriedades rurais. Consequentemente, muitos agricultores deixam o SPD para novamente praticarem o cultivo tradicional, com aração e gradagem, visando acelerar e aumentar seus ganhos econômicos.

A Embrapa, por meio de ações relacionadas ao projeto Rede de Pesquisa Solo Vivo, em parceria com a Itaipu Binacional, buscou desenvolver e validar, de forma participativa, ferramentas técnico-científicas que avaliam o desempenho da gestão do solo e da água em áreas de agricultura sob SPD. Dessa maneira, foram selecionadas microbacias (<100 ha) em diferentes locais nas regiões sul, sudeste e centro-oeste, onde o SPD é praticado e tem apresentado diferentes graus de eficiência quanto às taxas de erosão e demais características físicas, químicas e biológicas do solo, além de ganhos ou perdas na conservação das águas superficiais de pequenos córregos, que drenam tais microbacias, e de seus respectivos cursos e corpos d'água localizados mais a jusante.

Com esse objetivo, foram instalados equipamentos de medição para que através de coletores e sensores específicos, fossem monitorados diversos parâmetros relacionados ao ambiente, como precipitação pluviométrica, água do solo e água fluvial nas referidas microbacias (Figura 13.5). Dessa maneira, cada microbacia foi equipada com um *datalogger* de programação aberta (com sistema de telemetria), ao qual foram conectados: um pluviômetro de alta intensidade; um sensor para medir condutividade elétrica, temperatura e conteúdo volumétrico de água do solo (profundidade de 0 a 30 cm); um sensor de nível de água nos córregos; um sensor de turbidez e um sensor de temperatura e condutividade elétrica da água fluvial. O suprimento de energia elétrica adotado foi por meio de painel fotovoltaico e baterias dimensionadas para a necessidade de cada local e equipamentos relacionados. Tal instrumentação contou ainda com a instalação de vertedouros e calhas dimensionados para as diferentes ca-

racterísticas hidrológicas e dimensões das microbacias. Por meio desta estratégia foi possível a realização do monitoramento hidrossedimentológico planejado, ainda que com ocorrências de intempéries e eventos climáticos extremos.

Fotos: Ricardo de Oliveira Figueiredo.



Figura 13.5. Central de controle (a), e (b)coleta de água para análise físico-química no laboratório da Empresa Meio Ambiente.

Trata-se de fato de um esforço amostral intensivo em microbacias agrícolas, muito raro em nosso país, considerando tratar-se de áreas agrícolas sob SPD, e em diferentes condições edafoclimáticas. A geração das informações desse monitoramento tem fornecido conhecimentos específicos para a avaliação e planejamento das atividades agrícolas, assim como para o gerenciamento de bacias hidrográficas, como fluxo de geração de sedimentos e situação qualiquantitativa da água fluvial referentes às microbacias e SPD associados.

Dessa forma, pode-se avaliar os potenciais benéficos do SPD quando conduzido segundo os procedimentos referendados e recomendados por agentes agrotécnicos competentes. Nesse contexto, foi adotado uma metodologia que estuda a relação “chuva versus produção de sedimentos”, e avalia então o desempenho técnico e ambiental do uso da terra na microbacia hidrográfica, com base no índice beta –  $\beta$ , proposto por D’Agostini (1999), revisto e renomeado para IDE (Índice de dissipação de erosividade) por D’Agostini et al. (2017).

Os resultados obtidos nesse monitoramento (Gonçalves, 2019), e em estudos associados, como por exemplo o “Índice de qualidade do plantio direto (IQP)” (Martins

et al., 2018) e “Índice de qualidade participativo do plantio direto para condições de irrigação por pivô central – IQPi” (Oliveira et al., 2019) tem servido como ferramentas didáticas para constatar-se respostas positivas do SPD, onde estes são adotados de forma correta, ao passo que tais respostas não são observadas com a mesma qualidade em microbacias onde o SPD não é devidamente praticado. Por exemplo: diferenças em padrões de turbidez da água fluvial, transformados em valores de sedimentos em suspensão, em áreas monitoradas, demonstram maior eficácia de um SPD mais bem executado em termos de manejo de solo. Tais resultados têm sido também utilizados para estimular discussões em reuniões e contatos com os inúmeros agricultores nas regiões trabalhadas. Paralelamente, tais resultados podem ser úteis para ações da Agência Nacional de Águas (ANA) que se relacionem aos potenciais benefícios do SPD em bacias agrícolas.

Transcorrido o tempo ora previsto para o Projeto, novos estudos foram sendo iniciados, dentre os quais destacam-se a amostragem periódica de água fluvial e a implementação de coletores automáticos de amostras fluviais. Esses, uma vez programados para realização de coletas em momentos específicos, durante aumentos ou decréscimos de vazão, propiciam que se realizem análises dos sedimentos transportados e das características químicas da água fluvial, bem como a adoção de monitoramento remoto e em tempo real, das variações medidas pelos sensores. Essa estratégia amplia o conhecimento gerado resultando em informações valiosas sobre a perda de sedimentos (solos), nutrientes e carbono pela via hídrica no cultivo agrícola praticado nas microbacias.

Destaca-se que o monitoramento adotado possui potencial de gerar informações confiáveis e indispensáveis, as quais analisadas juntamente com os demais aspectos listados acima contribuem grandemente para a sustentabilidade na agricultura no âmbito do SPD, por exemplo, bem como para adoção de políticas públicas voltadas à conservação do solo e recursos hídricos. Os dados e as informações gerados poderão proporcionar, inclusive, simulações de fluxos hidrossedimentológicos em diferentes cenários de manejo dos solos e de flutuações no regime climático da região trabalhada.

Como enfatizado por Figueiredo; Green (2019), em períodos chuvosos ocorrem maiores entradas de sedimentos perdidos da área agrícola da bacia para os cursos d'água, prejudicando a qualidade da água, causando assoreamento, enchentes relacionadas, e impactando processos relacionados ao funcionamento do ecossistema aquático, que depende da transparência do leito dos rios afetados pelos nutrientes que adentram o canal fluvial. Por sua vez, durante os períodos de estiagem, os elementos químicos são exportados da parte terrestre para esses cursos d'água na forma dissolvida, tanto pelos fluxos dos estoques hídricos subterrâneos como pelo escoamento sub-superficial nos solos da bacia. Portanto, avaliações sobre os efeitos das áreas agrícolas sobre os recursos hídricos precisam considerar as mudanças sazonais e





Figura 13.7. Concentração de pivôs centrais próximos às áreas de monitoramento no município de Itai, SP.  
Fonte: Os autores.

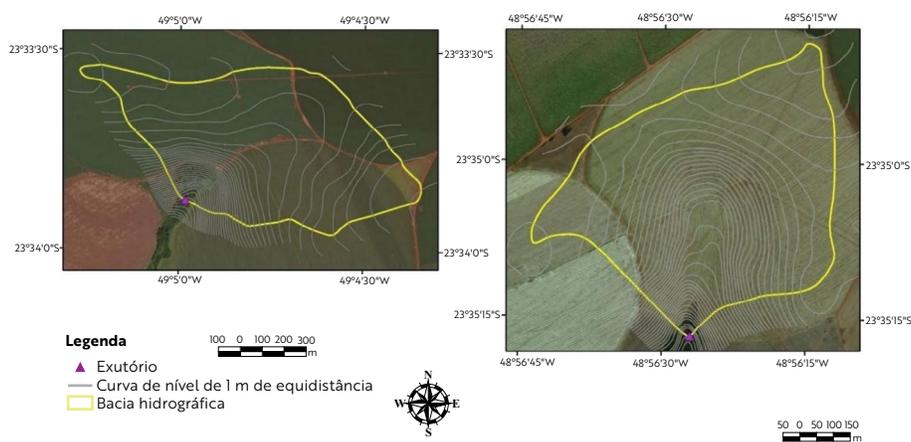


Figura 13.8. Delimitação das microbacias ITA-1 (Esquerda) e ITA-2 (Direita).  
Fonte: Gonçalves (2019).

Tabela 13.2. Descrição morfométrica das microbacias ITA-1 e ITA-2

MBH	Altitude (m)	Declividade média (%)	Área (km <sup>2</sup> )
ITA-1	613 - 647	2,3	0,74
ITA-2	672 - 710	4,2	0,47

Fonte: Adaptado de Gonçalves (2019).

Em termos hidrográficos, o município localiza-se no noroeste da UGRHI<sup>1</sup> 14, tendo como corpos d'água principais o Rio Taquari-Guaçu, o Ribeirão das Posses ou do Boqueirão e o Ribeirão dos Carrapatos que corta o município de norte a sul, ressaltando que todos deságuam na Represa Jurumirim<sup>2</sup>, sendo o Ribeirão dos Carrapatos o manancial de abastecimento do município (Classe 2<sup>3</sup>) com vazão na ordem de 45,75 L s<sup>-1</sup> (São Paulo, 2021). As microbacias monitoradas encontram-se nas sub-bacias do Ribeirão dos Carrapatos e do Ribeirão da Restinga Grossa (que desembocam no rio Taquari próximo à sua foz na Represa de Jurumirim), em área de agricultura irrigada.

Estações automáticas (EHS) para monitorar chuva e vazão (calha "H"), e estimar a concentração de sólidos em suspensão no curso d'água das microbacias e calcular a dissipação da erosividade das chuvas (IDE), coletaram dados entre outubro/2017 a janeiro/2019. Foram estudados 61 eventos de chuva com intensidade superior a 10 mm h<sup>-1</sup> na bacia ITA-1, e 49 em ITA-2. A vazão média nas microbacias foi 5,8 e 8,7 L s<sup>-1</sup>, respectivamente em ITA-1 e ITA-2. O índice hidrossedimentológico IDE resultou em 0,787 (ITA-1) e 0,884 (ITA-2). O índice participativo IQP com base em dados da literatura resultou em 5,62 (ITA-1) e 6,89 (ITA-2). Com base nos indicadores hidrossedimentológicos, o ambiente agrícola presente em ITA-2 foi mais eficiente no controle das perdas de solo e água e manutenção da vazão nos pontos monitorados do que em ITA-1. Os índices IDE e IQP se relacionaram diretamente no presente estudo de caso, mostrando que quanto maior o IQP, maior foi o IDE e vice-versa, e representam o desempenho ambiental do manejo agrícola no âmbito de microbacias hidrográficas.

<sup>1</sup> Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo.

<sup>2</sup> Com área de aproximadamente 450 km<sup>2</sup> (Panarelli et al., 2001).

<sup>3</sup> Segundo a Resolução CONAMA 357/2005: CLASSE 2, águas que podem ser destinadas a(o): Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; Proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário (natação, esqui aquático e mergulho), conforme CONAMA 274/00; Irrigação de hortaliças e plantas frutíferas, parque e jardins e outros com os quais o público possa vir a ter contato direto; Aquicultura e à atividade de pesca.

Os resultados do monitoramento, entre outubro de 2017 e janeiro de 2019, mostraram que os coeficientes utilizados - IDE e IQP (que apresentam objetivos similares de avaliar as condições de superfície determinadas pela intervenção humana), apresentaram resultados condizentes pelas variáveis utilizadas. A cobertura do solo de cada microbacia monitorada, aliada ao fato de manejos de qualidade diferentes adotados em cada propriedade, são as principais determinantes desses resultados (Gonçalves, 2019).

Em suma, a ação humana sobre estes coeficientes, como bem ponderado por Pellegrini (2013) e por D'Agostini (1999), apesar de subjetiva e difícil quantificação, certamente determina a dinâmica hidrossedimentológica em bacias hidrográficas, pois os agricultores decidem quais as áreas serão utilizadas para lavoura, pastagem, reflorestamento ou preservação, e também determinam a utilização de práticas conservacionistas e o tipo de manejo do solo utilizado para minimizar os impactos do potencial energético despendido pelas variáveis climáticas na geração e concentração de escoamentos.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como foi aqui apresentado, a fundamentação teórica para o monitoramento hidrológico de bacias visando a sustentabilidade na agricultura e para as avaliações de serviços ambientais hídricos são essenciais para a qualidade e relevância deste monitoramento.

Recomenda-se que seja realizada uma boa caracterização da bacia monitorada, onde modelos que utilizem os dados obtidos nas avaliações serão de grande utilidade quando aplicados nesta bacia. Além disso, é de grande valia o conhecimento dos pressupostos tanto para o monitoramento hidrobiogeoquímico como para o uso de bioindicadores de qualidade ambiental.

Os estudos e monitoramentos aqui relatados demonstram a variabilidade e complexidade do tema a depender do bioma onde está a bacia e das práticas agrícolas nela presentes. A relevância da conservação da bacia hidrográfica pode, enfim, ser demonstrada através dos serviços ambientais hídricos promovidos por práticas sustentáveis que colaboram para uma gestão ambiental eficiente.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. F.; RIBEIRO, J. S.; KUMMROW, F.; NOGUEIRA, A. J. A.; MONTAGNER, C. C.; UMBUZEIRO, G. A. Pesticides in Brazilian freshwaters: a critical review. *Environmental Science: Processes & Impacts*, v. 18, n. 7, p. 779–787, 2016.
- ALMEIDA, T. A. **Impactos decorrentes das mudanças ocasionadas pelo uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica urbana de UFJF: Campus JF sobre escoamento superficial.** Juiz de Fora: UFJF, 2016. 91 f. Monografia (Graduação) - Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.
- ANTONELLI, V.; THOMAZ, E. L. Caracterização do meio físico da bacia do Arroio Boa Vista, Guamiranga-PR. *Revista Caminhos da Geografia*, v. 8, p. 46-58, 2007.
- BARBOSA, M. E. F.; FURRIER, M. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Guruji, litoral sul do estado da Paraíba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13., 2009, Viçosa. *Anais...Viçosa: UFV*, 2009.
- BARIZON, R. R. M.; FIGUEIREDO, R. O.; DUTRA, D. R. C. S.; REGITANO, J. B.; FERRACINI, V. L. Pesticides in the surface waters of the Camanducaia River watershed, Brazil. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, v. 55, n. 3, p. 283-292, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/03601234.2019.1693835>.
- BENSTEAD, J. P.; DOUGLAS, M. M.; PRINGLE, C. M. Relationships of stream invertebrate communities to deforestation in eastern Madagascar. *Ecological Applications*, v. 13, p. 1473–1490, 2003.
- BRIGANTE, J.; DORNFELD, C. B.; NOVELLI, A.; MORRAYE, M. A. Comunidade de macroinvertebrados bentônicos no rio Mogi-Guaçu. In: BRIGANTE, J.; ESPÍNDOLA, E. L. G. (org.). *Limnologia fluvial*. São Carlos: Editora RIMA, 2003. p. 181-187.
- CETESB. **Gestão ambiental e dos recursos hídricos.** Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subteraneas/informacoes-basicas/gestao-ambiental-e-dos-recursos-hidricos>. Acesso em: 30 ago. 2021.
- CONROY, E.; TURNER, J. N.; RYMSZEWICZ, A.; O’SULLIVAN, J. J.; BRUEN, M.; LAWLER, D.; LALLY, H.; KELLY-QUINN, M. The impact of cattle access on ecological water quality in streams: examples from agricultural catchments within Ireland. *Science of the Total Environment*, v. 547, p. 17-29, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.120>.
- COSTA, C. F. G. **Processos hidrobiogeoquímicos de carbono e nitrogênio em diferentes usos da terra nas mesobacias dos rios Jaguari e Camanducaia.** 2018. 125 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba.
- CRUZ, P. P. N.; GREEN, T. R.; FIGUEIREDO, R. O.; PEREIRA, A. S.; KIPKA, H.; SAAD, S. I.; SILVA, J. M.; GOMES, M. A. F. Hydrological modeling of the Ribeirão das Posses: an assessment based on the Agricultural Ecosystem Services watershed scale model. *Revista Ambiente e Água*, v. 12, p. 351-364, 2017.
- D’AGOSTINI, L. R. **Erosão: o problema mais que o processo.** Florianópolis: EDUFSC, 1999. 131 p.
- D’AGOSTINI, L. R.; DENARDIN, J. E.; LEMAINSKI, J. **Índice de dissipação de erosividade.** Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2017. 19 p. (Embrapa Trigo. Documentos online, 175).

DING, J.; JIANG, Y.; LIU, Q.; HOU, Z.; LIAO, J.; FU, L.; PENG, Q. Influences of the land use pattern on water quality in low-order streams of the Dongjiang River basin, China: a multi-scale analysis. **The Science of the Total Environment**, v. 551-552, p. 205-216, 2016.

DIRZO, R.; YOUNG, H. S.; GALETTI, M.; CEBALLOS, G.; ISAAC, N. J. B.; COLLEN, B. 2014. Defaunation in the Anthropocene. **Science**, v. 345, n. 6195, p. 401-406, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1251817>.

FERRACINI, V. L., PESSOA, M. C. Y. P., SILVA, A. S., SPADOTTO, C. A. A análise de risco de contaminação das águas subterrâneas da região de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA). **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v. 11, p. 1-6, 2001.

FIGUEIREDO, R. de O.; GREEN, T. R. **A conservação de bacias e os desafios para a sustentabilidade da agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2019. 19 p. il. color. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 120).

FIGUEIREDO, R. de O. Pequenas bacias agrícolas na Amazônia Oriental. In: SEMINÁRIO DA REDE AGROHIDRO, 1., 2014, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2014. p. 6769.

FIGUEIREDO, R. de O.; SIMIOLI, M. M.; JESUS, T. V. U. C.; CRUZ, P. P. N.; BAYMA, G.; NOGUEIRA, S. F.; GREEN, T. R.; CAMARGO, P. B. Hydrobiogeochemistry of two catchments in Brazil under forest recovery in an environmental services payment program. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, p. 1-16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08773-6>.

FIDALGO, E. C. C.; PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; SCHULER, A. E. **Manual para pagamento por serviços ambientais hídricos: seleção de áreas e monitoramento**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 80 p.

FRITZSONS, E.; MANTOVANI, L. E. Áreas prioritárias para restauração das florestas ciliares: um exemplo no sul do Brasil. **Ambiência**, v. 13, n. 3, p. 537-551, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.5935/ambiencia.2017.03.01>.

GOMES, M. A. F.; PEREIRA, L. C.; TÔSTO, S. G.; FIGUEIREDO, R. de O.; GALDINO, S.; QUARTAROLI, C. F. Perdas de água e de sedimentos em uma sub-bacia como contribuição à análise de serviços ambientais, Extrema, MG. **Revista Terceira Margem Amazônia**. v. 6, n. especial 16, p. 127-137, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.36882/2525-4812.2021v6i16.ed.esp.p127-137>.

GOMES, M. A. F.; PESSOA, M. C. P.Y. (org.). **Planejamento ambiental do espaço rural com ênfase em microbacias hidrográficas: manejo de recursos hídricos, ferramentas computacionais e educação ambiental**. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2010. p. 412

GONÇALVES, A. O. Caracterização hidrossedimentológica e sua relação com o índice de qualidade participativo do plantio direto, na bacia do Alto Paranapanema-SP. 2019. 130 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo/ESALQ, Piracicaba. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.11.2020.tde-22012020-095632>.

GONÇALVES, A. A.; CRUZ, M. A. S.; AMORIM, J. R. A.; MOTA, P. V. M. Avaliação da qualidade das águas do rio Siriri por meio de análise multivariada. In: SEMINÁRIO DA REDE AGROHIDRO, 4., 2016, Brasília, DF. **Água e agricultura: incertezas e desafios para a sustentabilidade frente às mudanças do clima e do uso da terra: anais**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2016. 290 p.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Degradação ambiental. In: CUNHA, S. B. (ed.). **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 337-339.

HEATHCOTE, I. H. **Integrated watershed management: principles and practice**. 2. ed. Hoboken, John Wiley & Sons, 2009. p. 453.

HUGHES, R. M.; KAUFMANN, P. R.; HERLIHY, A. T.; KINCAID, T. M.; REYNOLDS, L.; LARSEN, D. P. A process for developing and evaluating indices of fish assemblage integrity. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 55, p. 1618–1631, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1139/f98-060>.

IÑIGUEZ-ARMIJO, C.; RAUSCHE, S.; CUEVA, A.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, A.; ESPINOSA, C.; BREUER, L. Shifts in leaf litter breakdown along a forest-pasture-urban gradient in Andean streams. **Ecology and Evolution**, v. 6, n. 14, p. 4849–4865, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/ece3.2257>.

IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>. Acesso em: 24 nov. 2018.

KARR, J. R. 1991. Biological integrity: a long neglected aspect of water resource management. **Ecological Applications**, v. 1, n. 1, p. 66–84. DOI: <https://dx.doi.org/10.2307/1941848>.

LANDAU, E. C.; GUIMARAES, D. P.; SILVA, P. A. de A.; SOUZA, D. L. de. **Concentração de áreas irrigadas por pivôs centrais no Estado de São Paulo - Brasil**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2014. 37 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 100).

MACHADO, C. J. S. Recursos hídricos e cidadania no Brasil: limites, alternativas e desafios. **Revista Ambiente & Sociedade**, v. 6, n. 2, p. 121–136, 2003.

MARTINS, A. L. da S.; CONTE, O.; OLIVEIRA, P. de; DOSSA, A. A.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; HERNANI, L. C.; RALISCH, R.; LEONARDO, H. C. L.; LUNARDI, L.; SALTON, J. C.; TOMAZI, M.; PITOL, C.; DE BONA, F. D.; BOEIRA, R. C. **Avaliação ex ante do Índice de Qualidade Participativo do Plantio Direto (IQP) com produtores do Centro-Sul do Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018. 52 p. (Embrapa Solos. Documentos, 203).

MARTINS, I.; MACEDO, D. R.; HUGHES, R. M.; CALLISTO, M. Are multiple multimetric indices effective for assessing ecological condition in tropical basins? **Ecological Indicators**, v. 110, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105953>.

MATSUZAKI, K. Validation trial of Japan's zinc water quality standard for aquatic life using field data. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 74, p. 1808–1823, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.07.003>.

MATTOS, L. M.; SILVA, E. F., Influência das propriedades de solos e de pesticidas no potencial de contaminação de solos e águas subterrâneas. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v. 9, p. 103–124, 1999.

METZGER, M. J.; ROUNSEVELL, M. D. A.; ACOSTA-MICHLIK, L.; LEEMANS, R.; SCHRÖTER, D. The vulnerability of ecosystem services to land use change. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 114, p. 69–85, 2006. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.025>.

MEZA-S., A. M.; RUBIO-M., J.; G-DIAS, L.; M-WALTEROS, J. Water quality and composition of aquatic macroinvertebrates in the sub watershed of river Chinchiná. **Caldasia**, v. 34, n. 2, p. 443–456, 2012.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being: a framework for assessment**. Washington, DC: Island Press, 2003. Disponível em: [https://pdfwri.org/ecosystems\\_human\\_wellbeing.pdf](https://pdfwri.org/ecosystems_human_wellbeing.pdf). Acesso em: 27 maio 2021.

MOLDAN, B.; CERNÝ, J. (ed.). **Biogeochemistry of small catchments: a tool for environmental research**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1994. 419 p.

MONTELES, J. S.; GERHARD, P.; FERREIRA, A.; SONODA, K. C. Agriculture impacts benthic insects on multiple scales in the Eastern Amazon. **Biological Conservation**, v. 255, p. 108998, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2021.108998>.

THE NATURE CONSERVANCY. **Recuperação ambiental na bacia hidrográfica do rio Jaguari/SP: plano de negócios**. Curitiba: Brazil's Impact Investment Exchange, 2014. 44 p.

NÓBREGA, R. L. B.; GUZHA, A. C.; LAMPARTER, G.; AMORIM, R. S. S.; COUTO, E. G.; HUGHES, H. J.; JUNGKUNST, H. F.; GEROLD, G. Impacts of land-use and landcover change on stream hydrochemistry in the Cerrado and Amazon biomes. **Science of The Total Environment**, v. 635, p. 259–274, 2018.

OLIVEIRA, P. de; TAVARES, S. R. de L.; MARTINS, A. L. da S.; RALISCH, R.; HERNANI, L. C. **Proposta de índice de qualidade participativo do plantio direto para condições de irrigação por pivô central - IQPi**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2019. 33 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 119).

PANARELLI, E. A.; NOGUEIRA, M. G.; HENRY, R. Short-term variability of copepod abundance in Jurumirim Reservoir, São Paulo, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 61, p. 577–598, 2001. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S1519-69842001000400007>.

PAULA, E.V.; GUIMARÃES, J.; IBAIXE, D. R. Estimativa da produção de sedimentos e análise de cenários das áreas prioritárias à recuperação ambiental na bacia hidrográfica do rio Jaguari (MG/SP), **Revista Continente**, n. 5, jul./dez. 2014. Disponível em: <http://revistacontinentes.com.br/index.php/continentes/article/view/51>. Acesso em: 06 jul. 2021.

PELLEGRINI, A. **Índices de desempenho ambiental e comportamento hidrossedimentológico em duas bacias hidrográficas rurais**. 2013. 108 f. Tese (Doutorado em Processos químicos e ciclagem de elementos) -Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

PRADO, R. B.; FIGUEIREDO, R. de O.; CRUZ, M. A. S.; PARRON, L. M.; FELIZZOLA, J. F.; FRITZSONS, E.; FIDALGO, E. C. C.; PEDREIRA, B. da C. C. G.; CRUZ, P. P. N. da. Pesquisas sobre os impactos do uso e cobertura da terra nos recursos hídricos: caracterização, estado da arte, limitações e perspectivas futuras. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 93 p. il. color. (Embrapa Solos. Documentos, 193).

REIS, L. C. **Avaliação hidrobiogeoquímica da bacia do Ribeirão das Posses no âmbito do Programa Conservador das Águas, Extrema/MG**. 2018. 71 p. (Dissertação de Mestrado - Ecologia Aplicada) – CENA, USP, Piracicaba.

RODRIGUES, L. N.; PADOVANI, C. R.; OLIVEIRA, M. D. de; SORIANO, B. M. A. (ed.). **Memórias do III Seminário e I Workshop da Rede Agrohidro**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2016. 24 p. (Embrapa Pantanal. Documentos, 140).

- SÃO PAULO. **Plano municipal integrado de saneamento básico - município: Itai**. Disponível em: [https://smas16.blob.core.windows.net/conesan/sites/253/2020/10/prs\\_ugrhi\\_14\\_2014.pdf](https://smas16.blob.core.windows.net/conesan/sites/253/2020/10/prs_ugrhi_14_2014.pdf). Acesso em: 21 maio 2021.
- SANTOS, G. V.; DIAS, H. C. T.; SILVA, A. P. S.; MACED, M. N. C. Análise hidrológica e socioambiental da bacia hidrográfica do córrego Romão dos Reis, Viçosa-MG. *Revista Árvore*, v. 31, p. 931-940, 2007.
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. E-book.
- SAULINO, H. H. L.; TRIVINHO-STRIXINO, S. Native macrophyte leaves influence more specialisation of neotropical shredder chironomids than invasive. *Hydrobiologia*, v. 813, p. 189-198, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s10750-018-3252-z>.
- SHAO, H.; YANG, W.; LINDSAY, J.; LIU, Y.; YU, Z.; OGINSKY, A. An open source gis-based Decision Support System for watershed evaluation of best management practice. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 53, n. 3, p. 521- 531, 2017.
- SILVA, M. S. G. M. e; QUEIROZ, J. F. de; LOSEKANN, M. E.; MARIGO, A. L. S.; NASCIMENTO, M. Utilização de coletores com substrato artificial para o biomonitoramento da qualidade da água na aquicultura. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2012. 8 p. (Embrapa Meio Ambiente. Circular Técnica, 23).
- SILVEIRA, M. P. Estudo da comunidade de macroinvertebrados aquáticos e sua utilização na avaliação da qualidade da água na bacia do rio Macaé, Estado do Rio de Janeiro. 2001. 95 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- SOLBÉ, J. F. L. G. (ed.). *Effects of land use on fresh waters*. Chichester: Ellis Horwood, 1986. p. 283-295
- SONODA, K. C. *Comunidades de insetos aquáticos em dois trechos do Córrego Sarandi, Distrito Federal*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010a. 19 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 280).
- SONODA, K. C. *Variação temporal da fauna de insetos aquáticos do Córrego Sarandi, DF*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010b. 23 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 291).
- SONODA, K. C.; MATTHAEI, C. R.; TRIVINHO-STRIXINO, S. Contrasting land uses affect Chironomidae communities in two Brazilian rivers. *Fundamentals and Applied Limnology – Archi für Hydrobiologie*, v. 174, n. 2, p. 173-184, 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.1127/1863-9135/2009/0174-0173>.
- SONODA, K. C.; MONTELES, J. S.; FERREIRA, A.; GERHARD, P. Chironomidae from Eastern Amazon: Understanding the differences of land-use on functional feeding groups. *Journal of Limnology*, v. 77, n. s1, p. 196-202, 2018a. DOI: <https://dx.doi.org/10.4081/jlimnol.2018.1799>.
- SONODA, K. C.; MONTELES, J. S.; FERREIRA, A.; GERHARD, P. *Chironomidae da Amazonia Oriental: resposta da funcionalidade alimentar aos diferentes usos/cobertura do solo*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2018b. 14 p. Embrapa Meio Ambiente. Comunicado Técnico, 57).

SONODA, K. C.; VETTORAZZI, C. A.; ORTEGA, E. M. M. Relação entre uso do solo e composição de insetos aquáticos de quatro bacias hidrográficas do estado de São Paulo. *Neotropical Biology and Conservation*, v. 6, n. 3, p. 187-200, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.4013/nbc.2011.63.06>.

SPRUILL, C. A.; WORKMAN, S. R.; TARABA, J. L. Simulation of daily and monthly. *Transactions of the ASABE*, v. 43, p. 1431-1439, 2000.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. *Revista Uniara*, v. 20, p. 137-157, 2007.

TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade: ABHR, 1997. 943 p.

UN-WATER GLOBAL WATER PARTNERSHIP. **Roadmapping for advancing Integrated Water Resources Management (IWRM) processes: based on the Copenhagen Initiative on Water and Development**. Genebra: GWP, 2007. 6 p.

USEPA. **National rivers and streams 2008-2009: a collaborative survey**, EPA/841/R-16/007. Washington, DC.: Office of Water and Office of Research and Development, 2016.

VEITH, T. L.; LIEW, M. W. van; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Parameter sensitivity and uncertainty in SWAT: a comparison across five USDA-ARS watersheds. *Transactions of the ASABE*, v. 53, p. 1477-1486, 2010.

VIEUX, B. E. **Distributed hydrologic modeling using GIS**. 2.ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. 289 p.

WAGENER, T.; WHEATER, H.; GUPTA, H. V. **Rainfall-runoff modeling in gauged and ungauged catchments**. Londres: Imperial College, 2004. 306 p.

WALLING, D. E., WEBB, B. W. Solutes in rivers systems. In: TRUDGILL, S.T. (ed.). **Solutes processes**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1986. 512 p. Cap. 7, p. 251-327. (Landscape Systems)

WEIGEL, B. M.; WANG, L.; RASMUSSEN, P. W.; BUTCHER, J. T.; STEWART, P. M.; WILEY, M. J. Relative influence of variables at multiple spatial scales on stream macroinvertebrates in the Northern Lakes and Forest ecoregion, USA. *Freshwater Biology*, v. 48, p. 1440-1461, 2003.

ZEILHOFER, P.; CALHEIROS, D. F.; OLIVEIRA, M. D.; DORES, E. F. G. C.; LIMA, G. A. R. FANTIN-CRUZ, I. Temporal patterns of water quality in the Pantanal floodplain and its contributing Cerrado upland rivers: implications for the interpretation of freshwater integrity. *Wetlands Ecology and Management*, v. 24, p. 697-716, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11273-016-9497-8>.



# ORGANISMOS-TESTE E BIOMARCADORES COMO FERRAMENTAS NA AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA EM DIFERENTES ECOSISTEMAS

*Vera Lucia Scherholz Salgado de Castro, Claudio Martín Jonsson e Mariana Silveira Guerra Moura e Silva*

## INTRODUÇÃO

A proteção do meio ambiente e de seus compartimentos (ar, água e solo) é uma questão importante para a saúde humana, pois quantidades crescentes de compostos químicos são produzidas e liberadas no ambiente. A ecotoxicologia estuda os efeitos de produtos químicos nos seres vivos, populações e comunidades dentro de ecossistemas definidos, bem como as características desses agentes e suas rotas de transferência e interações com outros compartimentos ambientais. Portanto, a ecotoxicologia estuda como um agente tóxico pode afetar as características e funções do ambiente quanto a seus aspectos físicos, químicos, biológicos e sociais, além dos mecanismos que determinam o nível de exposição e os efeitos sobre os organismos vivos. Também avalia as transformações e a bioacumulação dos poluentes dentro dos organismos e a biomagnificação trófica nos ecossistemas e em toda a biosfera. Com base nesses estudos, a ecotoxicologia visa formular ações preventivas úteis para prevenir ou mitigar efeitos prejudiciais à saúde ambiental (Lopes et al., 2021). Nesse cenário, a pesquisa ecotoxicológica deve ser vista como a base da identificação e caracterização dos perigos.

Os estudos ecotoxicológicos recentes se concentram em um grande número de biomarcadores e organismos de diferentes níveis da cadeia trófica, populações, comunidades e ecossistema. Os ensaios em escala de laboratório e de campo apresentam vantagens e desvantagens que devem ser avaliadas durante a fase de projeto experimental. Enquanto ensaios de laboratório podem ter melhor custo-benefício e permitir melhor controle de variáveis em comparação a estudos em escala de campo, estes últimos ensaios, por sua vez, são mais realistas, mas mais custosos e têm problemas logísticos frequentes (Salomão et al., 2020).

Dessa forma, os testes de ecotoxicidade são instrumentos usados na avaliação de risco ambiental para responder a perguntas sobre potenciais perigos intrínsecos nas avaliações de exposição. Consequentemente, o melhor entendimento das interações entre o ambiente e o composto químico ajudará no estudo desses efeitos e perigos devido à exposição tanto aos contaminantes tradicionais, quanto aos nanomateriais (NMs).

Neste cenário, este capítulo examina os resultados de ensaios em organismos expostos a compostos formulados de forma tradicional ou através da nanotecnologia, visando contribuir para a implementação de práticas eficazes de governança de risco na agricultura moderna. A seguir, serão abordados os organismos usados na avaliação ecotoxicológica (modelos padrão); os biomarcadores passíveis de uso, como alterações bioquímicas (atividade enzimática), físicas, reprodutivas e comportamentais; além de aspectos de bioacumulação desses compostos nos organismos. Por fim, serão discutidas algumas perspectivas futuras relativas ao tema.

## INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS AMBIENTAIS E BIOLÓGICOS NA TOXICIDADE

As características do contaminante e do ambiente, bem como do organismo afetado, influenciam a toxicidade. Várias dessas características afetam as respostas dos organismos, tais como biodisponibilidade (quantidade de uma determinada substância que entra no corpo e é capaz de apresentar um efeito), taxas de absorção, acúmulo de tecido, biodegradabilidade (capacidade de degradação biológica de materiais orgânicos por organismos vivos), vias bioquímicas de metabolização, características físico-químicas (volatilização, polaridade, solubilidade, partição hidrofílica-lipofílica, fotólise, oxidação, temperatura, salinidade, cinética de sorção – medida da adsorção ou dessorção em relação ao tempo em um determinado compartimento ambiental), entre outros. Os efeitos do contaminante no organismo-alvo podem ainda produzir efeitos reversíveis, irreversíveis, aditivos ou cumulativos na dependência da concentração, duração, frequência, taxa de captação, depuração e acúmulo do poluente e estágio de desenvolvimento do organismo.

As características dos compostos podem ser usadas em modelos matemáticos para contribuir com programas de monitoramento da saúde. Assim, foram avaliados 39 inseticidas na distribuição e acúmulo nos tecidos, utilizando suas características físico-químicas e os teores lipídicos nos tecidos para calcular a distribuição dos compostos entre os tecidos. Os inseticidas avaliados foram selecionados entre os registrados no Brasil para uso agrícola. O modelo de fugacidade nível I foi utilizado para os cálculos da distribuição do inseticida entre os tecidos dos músculos, vísceras, pele, gordura, sangue, fígado, rins e intestinos, considerando o coeficiente de partição octanol-água, a solubilidade em água e os teores de lipídios nos tecidos. A análise de agrupamento

dos compostos, realizada visando a identificação e separação de grupos de inseticidas com base em suas características físico-químicas, mostrou três diferentes classes de distribuição e acúmulo nos tecidos: 70 (86%), 44 (58%) e 9 (19%) (Paraíba et al., 2009).

Os poluentes ou contaminantes podem sofrer bioacumulação na cadeia alimentar. No caso dos NMs, a transferência trófica para o próximo nível depende da sua estabilidade e das propriedades da superfície. No entanto, outros possíveis efeitos coexistentes de contaminantes também podem interferir na nanotoxicidade: ele pode absorver, servir como transportador ou ligar-se a outros contaminantes; facilitar a formação de metabólitos mais reativos; e causar danos celulares.

Os produtos agrícolas que contêm NM prometem benefícios em relação aos produtos convencionais, como melhor direcionamento a espécies de pragas, maior eficácia e maior segurança ambiental, além de diminuição de perdas e outros. Nesse sentido, espera-se que, em um futuro próximo, a liberação controlada de pesticidas formulados com a ajuda da nanotecnologia se transforme em ferramenta importante para melhorar a produtividade e proteção das atividades agrícolas com menor impacto ao meio ambiente e à saúde dos agricultores (Albuquerque et al., 2020). Além disso, o refinamento das ferramentas de pesquisa *in silico* nos próximos anos pode favorecer o equilíbrio entre o rigor analítico e a facilidade operacional para a avaliação do risco ambiental.

O ambiente aquático é de particular interesse, uma vez que tende a ser o sumidouro final de contaminantes. Os NMs metálicos, em especial, quando entram em contato com o ecossistema aquático, sofrem dissolução de íons e sua cinética de liberação na água depende de muitos fatores (Pradhan; Mailapalli, 2017). Além disso, deve-se observar que as propriedades dos diversos nanocompostos, como as nanopartículas de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$  NPs), devem ser consideradas a fim de estabelecer modelos experimentais – especialmente de ecotoxicologia aquática – para estudar sua toxicidade sobre espécies ambientalmente relevantes (Clemente et al., 2012, 2014a). Entre elas, a irradiação por luz ultravioleta (UV) é um fator de particular preocupação para óxidos de metal fotocataliticamente ativos, como  $\text{TiO}_2$  NPs e nanopartículas de óxido de zinco (ZnO NPs). Nessas condições, ocorre a formação de espécies reativas de oxigênio (ROS). Assim, a iluminação desses NMs em águas superficiais resulta na formação de intermediários reativos, consequentemente alterando o potencial ecotoxicológico de micropoluentes orgânicos, incluindo pesticidas, devido à degradação catalítica. Clemente et al. (2013, 2014b) mostraram a importância de se considerarem as condições experimentais em testes ecotoxicológicos. Eles avaliaram os efeitos em peixes expostos a diferentes concentrações de  $\text{TiO}_2$  NPs e condições de iluminação, observando a sobrevivência dos organismos juntamente com biomarcadores de alterações bioquímicas e genéticas. Além disso, a exposição prolongada de peixes (21 dias) a duas fases de cristal de  $\text{TiO}_2$  NPs diferentes (anatase e uma mistura de 80% de anatase e 20% de rutilo) foram avaliadas nas mesmas condições de luz. Da mesma forma,

a ocorrência de efeitos subletais foi influenciada pela fase do cristal de  $\text{TiO}_2$  NP e pela condição de iluminação. A anatase pura causou mais dano oxidativo sem coexposição ao UV, enquanto a mistura anatase-rutilo causou mais efeitos subletais quando a exposição ocorreu sob UV (Clemente et al., 2015).

As características químicas do óxido de grafeno (OG) também podem afetar a toxicidade nos organismos. Clemente et al. (2017) observaram que o OG com debris era mais estável do que OG do qual foram retiradas as impurezas, como também na presença de ácido húmico (HA). O OG causou também maiores efeitos tóxicos em zebrafish (*Danio rerio*), peixe ornamental usado como modelo biológico. A concentração real no ambiente do NM pode ser então afetada pela influência ambiental em seu destino e transporte. Castro et al. (2018) observaram que o cenário mais seguro no compartimento aquático associado aos valores de concentração sem efeitos previstos para o OG foi estimado em 20 a 100 mg L<sup>-1</sup> (na ausência de HA) e 5 a 23 mg L<sup>-1</sup> (na presença de HA). Por sua vez, o HA que compõe a matéria orgânica natural (MON) melhorou significativamente a estabilidade do OG na água. Recentemente, Clemente et al. (2019) mostraram que a presença de MON alterou os efeitos tóxicos do OG em organismos aquáticos.

Em adição, Côté et al. (2017) observaram que os nanotubos de carbono de múltiplas camadas (*multi wall carbon nanotubes* – MWCNTs), revestidos com HA por um processo de moagem, apresentaram baixa toxicidade para organismos-modelo de testes de ecotoxicidade aquática como *Hydra attenuata*, *Daphnia magna* e *D. rerio*. O revestimento com HA foi responsável por favorecer a dispersão de MWCNTs em água ultrapura e por melhorar sua capacidade de remoção de cobre. O material híbrido HA-MWCNTs adsorveu 2,5 vezes mais íons de cobre (II) ( $\text{Cu}^{2+}$ ) do que MWCNTs oxidados com ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), evidenciando que é um material adsorvente muito eficiente na remoção de íons  $\text{Cu}^{2+}$  da água reconstituída.

Portanto, para definir os riscos ambientais e identificar novas direções de teste, é importante realizar bioensaios em diferentes organismos expostos às diferentes condições experimentais.

## ORGANISMOS-TESTE USADOS NA AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA

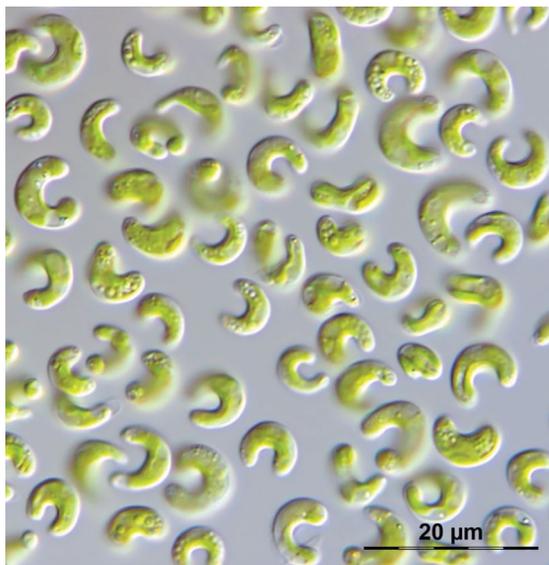
Os testes ecotoxicológicos requerem a utilização de organismos pertencentes a diferentes grupos taxonômicos. A utilização de animais deve ser avaliada criteriosamente no que diz respeito à adequação da experimentação em relação aos resultados esperados também por razões éticas. Tais questões levaram à elaboração de diversas normas e esforços legais que orientam a forma mais adequada de manuseá-los.

Nos bioensaios de laboratório, é importante incluir diferentes níveis tróficos da cadeia alimentar para que os resultados observados possam representar de maneira mais realista os efeitos dos contaminantes no ecossistema natural. Assim, por exemplo, para avaliação da toxicidade em ambientes aquáticos, podem ser usados microalgas, peixes, microcrustáceos e insetos.

## ORGANISMOS PARA A AVALIAÇÃO DA FITOTOXICIDADE

### Microalgas

As algas são muito utilizadas em testes ecotoxicológicos por serem produtores primários, o que significa que alterações em suas comunidades podem afetar níveis tróficos superiores. As algas possuem grande sensibilidade às alterações ocorridas no ambiente, com ciclo de vida curto, o que possibilita a observação de efeitos tóxicos em várias gerações. Nos testes com algas, avalia-se o crescimento algáceo, que pode ser determinado pela contagem celular e pelo conteúdo de clorofila. As algas *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus subspicatus* e *Pseudokirchneriella subcapitata* são muito utilizadas nos testes de toxicidade devido à facilidade de seu cultivo (Figura 14.1).



**Figura 14.1.** SAG 61.81 *Raphidocelis subcapitata*. Formerly called: *Pseudokirchneriella subcapitata* (Korshikov) – Microalga.  
Fonte: Lorenz (2016).

Foi estudada a toxicidade, através da inibição do crescimento algáceo, de formulações fungicidas à base de piraclostrobin e epoxiconazol (Prestes et al., 2011). Os compostos foram avaliados isoladamente e em formulação conjugada por 72 horas sobre a alga *P. subcapitata* mediante determinação da concentração efetiva média ( $CE_{50}$ ; causa efeito inibitório em 50% da amostra, referente ao crescimento, peso úmido ou teor de clorofila) dos princípios ativos de cada uma das formulações.

Os valores de  $CE_{50}$ -72h obtidos para a formulação à base de piraclostrobin foram de  $5,57 \text{ mg L}^{-1}$ ; para a formulação à base de epoxiconazol, de  $1,14 \text{ mg L}^{-1}$ ; e para a formulação conjugada, de  $0,20 \text{ mg L}^{-1}$ . Foi determinado o Índice de Aditividade (IA), sendo que os resultados sugeriram um forte sinergismo da mistura (IA = 12,6) quanto a sua ação tóxica sobre o organismo-teste. Assim, estimou-se um fator de magnificação de toxicidade de 13,6 vezes em relação à toxicidade individual de cada composto. Este fato realça a necessidade de revisão dos padrões limitantes desses fungicidas em corpos d'água, os quais tendem a subestimar os efeitos adversos resultantes da combinação dos agentes tóxicos.

## Macrófitas

As lemnas, populamente denominadas lentilhas-d'água, comumente se referem a um grupo de plantas flutuantes da família Lemnaceae. Estas macrófitas possuem crescimento rápido, são amplamente distribuídas e relativamente fáceis de cultivar, além de serem utilizadas em testes como representantes de produtores primários. As lemnas são tão sensíveis à toxicidade quanto outras espécies aquáticas, sendo bastante adequadas para uso em bioensaios de efluentes complexos e para testar a poluição por herbicidas no ambiente aquático, seja em águas superficiais, subterrâneas ou em sedimentos. As lemnas e as algas se complementam como organismos-teste em ensaios de fitotoxicidade, juntamente com as sementes de alfaca. Muitas espécies do gênero *Lemna* foram estudadas, principalmente *Lemna minor* e *Lemna gibba*, que foram recomendadas como espécies-teste padrão (Wang, 1990).

Realizou-se um estudo no qual se avaliou o efeito do OG na alteração do crescimento, peso úmido e teor de clorofila da *L. minor* (Castro et al., 2018). As plântulas foram expostas em placas de poliestireno de 12 poços, sendo dois frondes em 5 mL de solução-teste por poço, com 24 repetições para cada concentração-teste: 0,0; 0,1; 1; 10; e 100  $\text{mg L}^{-1}$  de OG. Para avaliar o crescimento, foram feitas contagens diárias do número de frondes após exposição a 0, 0,1, 1, 10 e 100  $\text{mg L}^{-1}$  de OG. Ao final do período de exposição, cada fronde foi pesada e determinou-se o efeito sobre a alteração na biomassa (peso úmido). Após a pesagem, foi feita extração da clorofila (Zhang, 2018), permitindo a quantificação das clorofilas a e b por equações descritas por Brain e Solomon (2007). O teor de clorofila foi calculado a partir da soma dos dois parâmetros. Após o período de

exposição, foram determinados os valores de  $CE_{50}$ -168h. Estes foram, respectivamente, > 100, 14,84 e 2,39 mg L<sup>-1</sup>, sendo o último parâmetro o mais sensível (Castro et al., 2018).

## Sementes de Alface

O bioensaio de toxicidade com sementes de *Lactuca sativa* é um teste em que se avaliam os efeitos fitotóxicos de compostos puros ou misturas complexas no processo de germinação de sementes e no desenvolvimento de mudas durante os primeiros dias de crescimento. Embora *L. sativa* não seja uma espécie representativa de ecossistemas aquáticos, as informações geradas a partir deste teste de toxicidade fornecem dados sobre o possível efeito de poluentes nas comunidades de plantas próximas às margens de corpos d'água contaminados.

O período de germinação e os primeiros dias de desenvolvimento da muda representam um estágio de grande sensibilidade a fatores externos adversos devido à ocorrência de numerosos processos fisiológicos, que podem sofrer interferência pela presença de uma substância tóxica, alterando a sobrevivência e o desenvolvimento normal da planta. Por outro lado, muitas das reações e processos envolvidos são gerais para a grande maioria das sementes; portanto, a resposta desta espécie e os dados obtidos a partir da aplicação do teste são amplamente representativos dos efeitos sobre as sementes em geral. Quanto à incorporação do teste em uma bateria de bioensaios, é importante considerar a sensibilidade da espécie *L. sativa*, o curto tempo de exposição do teste e os baixos custos associados, visto que os testes não requerem equipamentos sofisticados. O bioensaio tem aplicação na análise de amostras ambientais e no monitoramento de processos de desintoxicação, saneamento, controle de efluentes ou reutilização de bio sólidos (Sobrero; Ronco, 2004).

A respeito do uso deste ensaio na avaliação de risco de NMs, foi realizado um estudo sobre o efeito do OG (Castro et al., 2018) no qual sementes de alface foram obtidas comercialmente e os ensaios foram realizados de acordo com Bautista et al. (2013). No final do período de exposição, avaliou-se a porcentagem de germinação e a taxa de crescimento das raízes. Esta última foi determinada calculando os coeficientes angulares da regressão linear de curvas do tamanho da raiz em função do tempo (Basu; Pal, 2011). Para ambos os parâmetros avaliados, os valores de  $CE_{50}$  foram superiores a 100 mg L<sup>-1</sup>, correspondendo à maior concentração testada (Castro et al., 2018).

## Invertebrados Aquáticos

### Microcrustáceos

Os crustáceos do gênero *Daphnia* são bastante utilizados em testes de toxicidade por sua ampla distribuição em corpos de água doce; sua grande importância em mui-

tas cadeias alimentares, constituindo uma fonte significativa de alimento para peixes; seu ciclo de vida relativamente curto; fácil cultivo em laboratório; e sensibilidade a vários contaminantes do ambiente aquático. O efeito tóxico frequentemente avaliado em testes de toxicidade com microcrustáceos é a letalidade ou imobilidade em testes agudos ou crônicos. Nos testes de toxicidade crônica, os resultados podem ser expressos também como concentração de efeito não observado (Ceno). A espécie de *Daphnia* mais utilizada é a *D. magna* (Figura 14.2), cujo cultivo é bem conhecido, seguida da *Daphnia similis*. Por sua vez, o crustáceo de água salgada *Artemia salina* também constitui uma espécie bastante utilizada em testes de toxicidade para a estimativa da  $CE_{50}$ , 1 ou 2 dias após a eclosão de seus ovos.



Figura 14.2. Neonato de *Daphnia magna*.

Fonte: Hannas et al. (2010).

Avaliou-se o efeito toxicológico (inibição da mobilidade) de formulações fungicidas à base de piraclostrobin e epoxiconazol, isoladamente e em formulação conjugada sobre *D. similis*, mediante determinação da  $CE_{50}$ -48h de cada uma das formulações (Prestes et al., 2012). Além disso, foi avaliado o possível efeito sinérgico ou antagônico dos dois fungicidas quando usados simultaneamente, obtendo-se uma  $CE_{50}$ -48h de 18,36  $\mu\text{g L}^{-1}$  para a formulação à base de piraclostrobin; de 89,98  $\mu\text{g L}^{-1}$ , para a formulação à base de epoxiconazol; e de 23,50  $\mu\text{g L}^{-1}$ , para a formulação com ambos os compostos. Portanto, das três formulações estudadas, o piraclostrobin mostrou-se o mais tóxico para os organismos em estudo. A determinação do IA (Índice de Aditividade)

aponta que a mistura dos princípios ativos exerceu efeito toxicológico aditivo apenas sobre o organismo-alvo, diferentemente do ocorrido com as microalgas.

Em um estudo com exposição aos mesmos fungicidas por 21 dias, foi avaliada a toxicidade crônica relacionada à mortalidade e à produção de neonatos por indivíduo adulto (Prestes et al., 2013). Em relação à primeira, foram encontrados valores de Ceno de 0,098  $\mu\text{g L}^{-1}$  para a formulação à base de piraclostrobin, enquanto o valor foi de 1,324  $\mu\text{g L}^{-1}$  para a formulação à base de epoxiconazol, e de 0,341  $\mu\text{g L}^{-1}$  para a formulação com os dois fungicidas. Quanto à alteração na relação neonatos por adulto, foram encontrados valores Ceno de 0,579, 3,599 e 0,623  $\mu\text{g L}^{-1}$ , respectivamente, para piraclostrobin, epoxiconazol e formulação conjugada. Das três formulações utilizadas, o piraclostrobin isolado mostrou-se o mais tóxico para os organismos estudados. O parâmetro mais sensível às ações tóxicas foi a mortalidade comparada aos efeitos sobre a reprodução.

O uso indiscriminado de agroquímicos na aquicultura para combater doenças pode ter resultados negativos, com impactos sobre a saúde humana e o meio ambiente, levando ao aparecimento de microrganismos resistentes em fluxos de águas residuais que podem ser absorvidos no cultivo de alimentos ou passarem às águas superficiais. Nesse contexto, os polímeros naturais têm atraído grande interesse para o desenvolvimento de sistemas de liberação de agentes ativos. Óleos essenciais de eugenol e de alho foram encapsulados em nanopartículas (NPs) de zeína, formando NPs biodegradáveis. As formulações de NPs contendo os compostos botânicos apresentaram menor toxicidade em testes realizados com *A. salina* em comparação aos compostos não-encapsulados (Luis et al., 2020).

### Hidras

A hidra, um cnidário de água doce, pode ser usada como um organismo-modelo alternativo em testes de toxicidade de produtos químicos ambientais devido a sua alta sensibilidade e grande potencial de regeneração (Blaise et al., 2018; Murphy; Quinn, 2018). A hidra possui uma coluna de corpo tubular cilíndrica, hipóstomo apical rodeado por tentáculos que permitem capturar a presa e um disco basal com o qual se liga ao substrato. Todas as células estão em contato com o meio aquoso, o que facilita a penetração de substâncias tóxicas no animal. Ela tem sido usada como organismo-modelo em testes ecotoxicológicos por meio da avaliação de parâmetros como regeneração, reprodução e alterações morfológicas (Figura 14.3).

Foto: J.H. Vallim



Figura 14.3. Cultivo de *Hydra attenuata*.

Também pode ser usada como modelo útil na avaliação de ecotoxicidade de NMs. Nesse sentido, o carvão ativado do bagaço de cana-de-açúcar pirolisado (ACPB) carregado com AgNP pode ser útil na absorção de poluentes ambientais. O ACPB-AgNP inibiu o crescimento de bactérias (*Escherichia coli*), o que é uma vantagem promissora para a utilização desses materiais em processos de tratamento de efluentes e purificação de água. No entanto, o ACPB-AgNP também apresentou riscos ambientais, com efeito tóxico para a *H. attenuata* (concentração letal média – CL<sub>50</sub> – de 1,94 mg L<sup>-1</sup>), e suprimiu o desenvolvimento da raiz do tomate. Estes resultados chamam a atenção para as implicações ambientais de materiais de carvão ativado modificados com AgNP (Gonçalves et al., 2016). Ademais, apesar de não causar sinais de toxicidade aguda em concentrações variando de 0,1 a 100 µg mL<sup>-1</sup> de OG em *Caenorhabditis elegans* e em *D. similis*, a exposição ao grafeno levou à morte e desintegração de *H. attenuata* após exposição a 100 µg mL<sup>-1</sup> por 72 horas (Durán et al., 2015).

### Insetos Aquáticos

Os sedimentos são componentes essenciais dos ecossistemas aquáticos por constituírem locais fundamentais para o ciclo biogeoquímico e a cadeia alimentar (Burton

Junior et al., 2001). Nos ambientes fluviais, exercem um papel importante na dispersão e na reciclagem de metais contaminantes (Macklin et al., 2006) e podem armazenar e imobilizar os elementos potencialmente tóxicos de forma temporária (Förstner, 2003). O tamanho de seus grãos também desempenha importante papel, já que as partículas finas acumulam mais contaminantes do que as partículas grosseiras (Förstner, 2004). Assim, os sedimentos registram a memória do local principalmente em suas camadas mais profundas (Salomons; Brils, 2004), representando os diferentes níveis de poluição em uma bacia hidrográfica ao longo do tempo (Förstner, 2004).

A fauna bentônica (associada ao sedimento aquático) é bastante usada em estudos de biomonitoramento da qualidade da água, bem como em estudos ecotoxicológicos. Este grupo de animais apresenta grande riqueza de espécies com diferentes níveis de tolerância a impactos antrópicos e poluentes orgânicos e inorgânicos. No caso de estudos em ecotoxicologia, uma das espécies mais usadas como bioindicadora é a larva de inseto aquático do gênero *Chironomus* (família Chironomidae, ordem Diptera). Este organismo apresenta algumas vantagens no uso em laboratório como: ciclo de vida relativamente curto (cerca de 21 dias a 25 °C), ampla distribuição e sensibilidade a inúmeros poluentes (Park; Choi, 2009) (Figura 14.4).



Foto: MJ Hatfield

**Figura 14.4.** Larva de Chironomidae (Diptera: Chironomidae).

Fonte: Iowa State University (2011)

No Brasil, a espécie *Chironomus sancticaroli* é usada regularmente em pesquisas de contaminação de sedimentos pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb, 2012) e para avaliação da toxicidade de herbicidas, NPs e outros po-

luentes. Nesses estudos, pode ou não ser usado o sedimento original, tendo como substituintes água ou sedimento reconstituído (Barbosa, 2008; Pusceddu, 2009; Sales, 2009; Bonani, 2010). A vantagem do uso desta espécie é que ela é de ocorrência natural no Brasil e, por isso, é mais recomendada, pois, teoricamente, responde melhor aos contaminantes estudados em nosso país, sob nossas condições climáticas, de solo e de água.

Ao final do período de exposição, podem ser avaliados diferentes parâmetros, como percentual de mortalidade e medição do comprimento do corpo para avaliação do crescimento. Assim, Jonsson et al. (2015) investigaram a toxicidade do diflubenzuron para espécies aquáticas não-alvo, calculando a concentração de risco para 5% das espécies (HC5). Para larvas de *C. sancticaroli*, foi atribuído um valor EC<sub>50-48h</sub> > 100 mg L<sup>-1</sup>, verificando-se a presença de mobilidade da larva durante todo o período de exposição. Também pode ser calculada a frequência de deformidade do mento (peça do aparelho bucal), que pode sofrer alterações em sua estrutura como consequência de impactos por poluentes inorgânicos, principalmente metais pesados e pesticidas (Kuhlmann et al., 2000; Sanseverino; Nessimian, 2008), além de NMs (Albuquerque et al., 2021).

Castro et al. (2018) avaliaram o efeito do OG associado a HAs em nove organismos aquáticos, entre eles, o inseto aquático *C. sancticaroli*. Observou-se que, para este organismo, a CE<sub>50</sub> foi maior do que 100 mg L<sup>-1</sup>, a concentração mais alta testada e recomendada pela Organisation for Economic Co-operation and Development (1992, 2013). Já em relação à avaliação de AgNPs, obteve-se a CL<sub>50</sub> de 186 mg L<sup>-1</sup> após exposição aguda de 48 horas, enquanto para a exposição crônica foram calculadas CL<sub>50</sub> de 95 mg L<sup>-1</sup> e CL<sub>10</sub> de 35 mg L<sup>-1</sup> (Silva et al., 2019).

## Invertebrados do Solo

### Nematóides

Os nematóides são invertebrados diversificados e abundantes em sedimentos e solos com muitas espécies ocorrendo não apenas em habitats terrestres, mas também em águas superficiais. Diante da presença de compostos tóxicos no solo e em ambientes aquáticos, os testes de toxicidade com nematóides constituem uma alternativa adequada para a identificação de possíveis efeitos nos organismos. O *C. elegans* é um nematoide de vida livre no solo que se alimenta de bactérias, sendo encontrado também em grande número em ambientes aquáticos (Politz; Philipp, 1992). Tem sido amplamente utilizado em estudos ecotoxicológicos devido a sua facilidade de cultura, tempo curto de reprodução e transparência corporal, além do conhecimento acumulado a respeito de sua fisiologia, desenvolvimento e genética do organismo. O seu uso permite a avaliação de parâmetros de nanotoxicidade tais como reduções no

comprimento do corpo, progênie e comportamento de locomoção, além dos efeitos na sobrevivência. Testes com este nematoide já foram desenvolvidos para avaliar a toxicidade de amostras aquosas, sedimentares e de solo utilizando parâmetros de toxicidade, alterações de crescimento e de reprodução, como em estudos com NPs (Jacques et al., 2017). Outro nematoide, *Panagrolaimus*, é criado em meio de aveia e pode ser usado em testes ecotoxicológicos, como, por exemplo, para avaliar os possíveis efeitos do OG (Castro et al., 2018).

### Minhocas

As minhocas, enquanto invertebrados do solo, constituem um importante grupo da fauna edáfica. São sensíveis a alterações no seu habitat e têm sido utilizadas como organismos-teste e indicadoras da qualidade do solo. Os ensaios ecotoxicológicos com oligoquetas incluem parâmetros de mortalidade, reprodução, comportamento de fuga e bioacumulação. Também têm sido utilizados para testar o efeito de NPs inorgânicas e orgânicas (Heckman et al., 2011; Castro et al., 2018).

### Vertebrados

Muitas abordagens dos testes de toxicidade dependem de um conjunto de estudos que avaliam resultados observáveis em animais, como sinais clínicos ou alterações patológicas. Desta forma, a pesquisa científica tradicionalmente utiliza modelos animais criados em biotérios a fim de facilitar a manipulação e manter os animais em número, idade e sexo adequados ao estudo em andamento. A partir do início do século XX, os roedores ganharam destaque. Isso ocorreu graças a uma série de características inerentes aos animais usados, como tamanho reduzido, ciclo reprodutivo curto e prole numerosa. Em consequência, devido ao volume de conhecimento obtido sobre os roedores, foram desenvolvidos vários modelos experimentais.

Devido às questões éticas, o uso de animais na pesquisa tem sido motivo de discussão. As questões levantadas levaram ao desenvolvimento e à validação de novos métodos, bem como a implementação regulatória de testes alternativos em diversos países visando a sua harmonização. Estas ações foram iniciadas a partir do conceito de 3Rs (*reduction, refinement, replacement*), que objetiva, além de diminuir o número de animais utilizados na pesquisa, minimizar a dor e o desconforto e buscar alternativas para a substituição dos testes in vivo (Fenwick et al., 2009). Contudo, mesmo com o progresso de métodos alternativos nos últimos anos (estudos in vitro, culturas de células etc.), os modelos animais ainda são importantes para o fornecimento de informações sobre o organismo como um todo.

As implicações éticas dos testes ecotoxicológicos devem ser cuidadosamente consideradas no caso de vertebrados de acordo com a Lei nº 11.794, de 8 de outubro de 2008, conhecida como “Lei Arouca” que regulamenta o uso de animais em pesqui-

sas científicas no país. O Conselho Nacional de Controle de Experimentação Animal (Concea) é uma instância colegiada multidisciplinar de caráter normativo, consultivo, deliberativo e recursal que tem como competências a formulação de normas relativas à utilização humanitária de animais em ensino e pesquisa científica, além de estabelecer condutas para instalação e funcionamento adequado de biotérios e de laboratórios que usam a experimentação animal. O conselho é responsável também pelo credenciamento das instituições que desenvolvem atividades nesta área (Castro, 2013b).

O Concea, por meio da Resolução Normativa nº 33, de 18 de novembro de 2016, publicou o capítulo “Procedimentos – Roedores e Lagomorfos mantidos em instalações de instituições de ensino ou pesquisa científica” e a Resolução nº 35, de 11 de agosto de 2017, que altera a redação da Resolução Normativa nº 33. Ambos os capítulos fazem parte do *Guia Brasileiro de Produção, Manutenção ou Utilização de Animais em Atividades de Ensino ou Pesquisa Científica*.

### **Vertebrados Aquáticos (Peixes)**

Os peixes têm sido muito utilizados na pesquisa ecotoxicológica a fim de verificar potenciais danos pela exposição a diversos poluentes, bem como para estabelecer biomarcadores de exposição e pelo fato de pertencerem a uma importante cadeia trófica. O Concea publicou a Resolução Normativa nº 34, de 27 de julho de 2017, que institui o capítulo “Peixes mantidos em instalações de instituições de ensino ou pesquisa científica para fins de estudo biológico ou biomédico I – Lambari (*Astyanax*), Tilápia (*Tilapia*, *Sarotherodon* e *Oreochromis*) e Zebrafish (*Danio rerio*)”, além do anexo “Guia de peixes mantidos em instalações de instituições de ensino ou pesquisa científica para fins de estudo biológico ou biomédico I – Lambari (*Astyanax*), Tilápia (*Tilapia*, *Sarotherodon* e *Oreochromis*) e Zebrafish (*Danio rerio*)” da Resolução Normativa nº 34/2017, ambos pertencentes ao Guia Brasileiro de Produção, Manutenção ou Utilização de Animais em Atividades de Ensino ou Pesquisa Científica.

### **Zebrafish**

O zebrafish (*D. rerio*) tem se tornado um dos modelos alternativos aos roedores mais frequentemente utilizado. Ele emergiu rapidamente como um importante organismo-modelo na toxicologia aquática. O zebrafish, enquanto modelo experimental, é considerado robusto, pois tem baixo custo, porte pequeno, alta taxa de fecundidade, alto grau de homologia com genomas humanos, função conservada de áreas cerebrais e sistema de neurotransmissores. Estas características, em conjunto, permitem melhor entendimento dos efeitos de poluentes sobre as populações aquáticas. O modelo ainda pode substituir o uso de modelos clássicos com mamíferos (Parker, 2016). Este organismo-modelo tem sido utilizado em ecotoxicologia e outras áreas para medir os efeitos dos poluentes sobre a comunidade de peixes e a biodiversidade, uma

vez que ele geralmente reage com grande sensibilidade às mudanças no ambiente e seu comportamento pode ser influenciado por fatores ambientais (Kopp et al., 2018).

O teste de toxicidade aguda de embriões de peixe (*Fish Embryo Acute Toxicity* – FET) é usado como uma alternativa ao teste de toxicidade aguda em animais e em peixes juvenis e adultos. Este teste destina-se a determinar a toxicidade aguda de substâncias químicas em estágios embrionários de peixes (Organisation for Economic Co-operation and Development, 236, 2013), no qual, devido ao estágio primordial do desenvolvimento do sistema nervoso, considera-se que nem dor nem desconforto possam ser percebidos, podendo o organismo ser considerado como um substituto a organismos juvenis e adultos para estes testes. Estudos mostram que há efeitos toxicológicos semelhantes em embriões de zebrafish e em humanos (Yao et al., 2018).

Os testes com zebrafish fornecem importantes informações sobre a mortalidade e outros efeitos, como diminuição do comprimento padrão devido à exposição a compostos químicos. O zebrafish tem córion transparente, o que permite a observação atenta de seu desenvolvimento, motivo pelo qual é frequentemente usado em testes que investigam os efeitos diretos ou indiretos da substância no desenvolvimento embrionário. O desenvolvimento do zebrafish é rápido, com a embriogênese completa em 72 horas pós-fertilização (hpf) e a maioria dos órgãos totalmente desenvolvidos em 96 hpf, permitindo que atinjam a idade adulta em torno de 3 meses. Alguns produtos químicos podem afetar o desenvolvimento de embriões e larvas de zebrafish. Parâmetros usados em teste de toxicidade embrionária incluem mortalidade, taxa de eclosão, frequência cardíaca, presença de edema, entre outros (Clemente et al., 2019).

Os testes de toxicidade e sobrevivência de peixes são ferramentas importantes para o monitoramento da poluição ambiental. Dessa forma, são feitos testes durante os estágios iniciais de vida do peixe, seu crescimento e reprodução. Devido à barreira imposta pelo córion na penetração do composto em estudo, o teste FET é por vezes conduzido em embriões cujo córion foi removido. A remoção da membrana do córion garante a exposição direta dos embriões, reduzindo as fontes de variabilidade e contribuindo para a padronização dos testes de toxicidade embrionária em peixes (Medeiros et al., 2021).

A adsorção e a absorção de poluentes pelos peixes podem ocorrer através da superfície branquial. Após a absorção, os efeitos tóxicos dependem essencialmente de vários fatores tais como via de exposição, relação dose-resposta, tempo de exposição e interações nos mecanismos envolvidos no processo de absorção. Na dependência da espécie e dos estágios da vida, a sensibilidade dos organismos ao composto pode variar. Dada a possibilidade de exposição prolongada aos compostos presentes no ambiente, como os NMs, torna-se importante a aplicação de um conjunto de bioensaios na avaliação do perigo potencial, levando em consideração esses fatores. Em consequência, bioensaios como taxas de sobrevivência, malformação, tamanho, eclosão e

biomarcadores bioquímicos podem ser realizados em diferentes organismos expostos em diferentes condições experimentais (Pereira et al., 2021).

O efeito combinado da mistura dos herbicidas ametrina ( $500 \text{ g L}^{-1}$ ) e diuron ( $468 \text{ g kg}^{-1}$ ) + hexazinona ( $132 \text{ g kg}^{-1}$ ) foi avaliado sobre o peixe *D. rerio* (Tesolin et al., 2014). O ensaio foi baseado no teste FET da Organisation for Economic Co-operation and Development (2006), com duração de 96 horas. A partir dos testes agudos individuais, foi possível determinar a CL<sub>50-96h</sub> para os peixes expostos à ametrina, registrando-se um valor de  $53,23 \text{ mg L}^{-1}$ . No caso do diuron + hexazinona, a CL<sub>50-96h</sub> foi determinada em  $37,45 \text{ mg L}^{-1}$ . Quando em mistura, tanto a ametrina quanto o diuron + hexazinona tornaram-se mais tóxicos para o peixe, em comparação com a exposição individual a cada componente da mistura.

Observou-se ocorrência de edemas, atraso no desenvolvimento embrionário, absorção do saco vitelínico e diminuição na frequência cardíaca a partir das concentrações mais baixas da mistura. Pelos dados obtidos, concluiu-se que a mistura de ametrina e diuron + hexazinona é medianamente tóxica para o zebrafish e que os resultados seriam úteis na determinação de sua toxicidade no estabelecimento de concentrações máximas permissíveis desses herbicidas nos mananciais de água doce, com vistas à preservação de sua biota aquática associada.

## Biomarcadores na Avaliação Ecotoxicológica

A importância do uso dos biomarcadores como parâmetros biológicos de exposição às substâncias químicas deve-se ao fato de eles estarem diretamente relacionados aos efeitos na saúde. Assim, um biomarcador que indica a ocorrência de uma dose biologicamente eficaz ou de um dano inicial à saúde pode ser útil na identificação de perigos por meio da associação do composto com o efeito adverso e, em consequência, na determinação das relações dose-resposta e na estimativa do risco dos produtos químicos presentes no ambiente. Além dos organismos não-alvo dos diferentes níveis tróficos, os biomarcadores também podem ser utilizados como parâmetros de exposição dos agricultores aos agroquímicos, em uma proposta interdisciplinar, objetivando subsidiar a sustentabilidade de sistemas produtivos em quatro fases consecutivas, desde o diagnóstico da situação de saúde, até ações de desenvolvimento na área de estudo (Castro et al., 1999a).

Os biomarcadores devem ser de fácil utilização e de baixo custo de obtenção para permitir seu amplo uso. Eles devem mostrar facilidade de levantamento, de compreensão e de comparação, e o nível de detalhamento da medida deve ser adequado. Devem ainda facilitar o relacionamento de causa a efeito e envolver a medida de respostas biológicas, além de trazer informações quanto ao seu mecanismo de ação (Castro, 2004).

Atualmente, uma ampla gama de biomarcadores está disponível, como as mudanças genéticas e moleculares, que tendem a ocorrer primeiro, seguidas por respostas celulares (por exemplo, padrões de expressão gênica, níveis hormonais, atividades de enzimas específicas, estrutura e função de organelas) em tecidos e órgãos, até o nível biológico em que os danos podem se manifestar como prejuízo no crescimento, reprodução, anormalidades de desenvolvimento ou diminuição da sobrevivência (Shugart et al., 1992). Assim, com o monitoramento destas alterações, pode ser avaliado o dano potencial de um agente antes que ocorram perturbações e consequências mais graves. Os biomarcadores podem também ser usados para desenvolver ensaios de triagem rápidos, que podem complementar outras técnicas de teste, reduzindo o número de amostras. Nesse contexto, as técnicas baseadas em biomarcadores têm um papel importante a desempenhar no monitoramento e proteção ambiental (Zucchi et al., 2004).

Em geral, os biomarcadores usados no monitoramento ambiental são classificados em duas categorias principais: exposição e efeito. O biomarcador de exposição é avaliado pela presença de uma substância exógena ou de seu metabólito em um organismo, enquanto um biomarcador de efeito constitui uma alteração (bioquímica, fisiológica, comportamental ou outra) mensurável dentro de um organismo, que pode ser associada a um dano à saúde. De acordo com o documento, o uso dos biomarcadores deve levar em conta também questões éticas e sociais (Organização Mundial da Saúde, 1993). Há também o biomarcador de suscetibilidade ou genético que avalia os mecanismos relacionados à ação tóxica e ao grau de resposta dos indivíduos mas não é muito utilizado no monitoramento ambiental.

Em relação à toxicologia aquática, McCarty e Munkittrick (1996) estabeleceram quatro classes reconhecíveis de biomarcadores: 1) bioquímicos (enzimas, hormônios, metalotioneínas); 2) fisiológicos (crescimento, reprodução); 3) toxicológicos (comportamento, letalidade, teratogenicidade, carcinogenicidade); e 4) ecológicos/comunitários (alterações em estruturas e relações do ecossistema). Essas classes correspondem a diferentes funções e diferentes níveis de organização biológica.

A sensibilidade de um organismo a um poluente pode variar não só na dependência da qualidade ambiental, como luminosidade e temperatura, mas também no nível nutricional, idade, sexo, fase de desenvolvimento, características genéticas do organismo, competição entre indivíduos ou espécies, etc. Várias espécies vêm sendo empregadas internacionalmente em ensaios laboratoriais de testes de toxicidade, representando os mais diversos ecossistemas e níveis tróficos. No entanto, não existe uma única espécie de organismo que represente integralmente os efeitos causados em um determinado ecossistema. Em consequência, são usados organismos que são fáceis de reproduzir, adaptam-se facilmente às condições do laboratório e são representativos do ambiente em consideração (Castro; Jonsson, 2012).

A seguir, será exemplificado o uso de alguns biomarcadores comumente estudados.

## Biomarcadores Bioquímicos (Atividade Enzimática)

Os biomarcadores bioquímicos podem ser utilizados em grande variedade de organismos. Em estudos ecotoxicológicos, geralmente, são avaliadas várias enzimas. Dentre os biomarcadores mais usados, destacam-se as alterações das enzimas de biotransformação, cuja atividade nos organismos pode ser induzida ou inibida após a exposição aos compostos; e as do estresse oxidativo, uma vez que diversos compostos tóxicos ambientais ou seus metabólitos podem levar a efeitos tóxicos desta forma.

A toxicidade do herbicida ametrina para embriões de *D. rerio* foi avaliada usando parâmetros bioquímicos (Moura et al., 2018). Neste estudo, a enzima lactato desidrogenase mostrou resposta satisfatória na menor concentração-teste ( $4 \mu\text{g L}^{-1}$ ), indicando uma alta demanda de energia necessária para lidar com a condição de estresse. Níveis de enzimas antioxidantes foram alterados em concentrações intermediárias e altas, enquanto o dano oxidativo (peroxidação lipídica) foi observado na maior concentração testada ( $10 \text{mg L}^{-1}$ ). As correlações mais importantes foram entre a peroxidação lipídica (LPO) e enzimas do sistema antioxidante, como a glutathione redutase (GR), glutathione peroxidase (GPx) e glutathione-S-transferase (GST). Os resultados sugerem que, assim como para outros herbicidas do grupo das triazinas, o estresse oxidativo é uma das principais vias de toxicidade para ametrina. Concluiu-se que os efeitos subletais foram observados para concentrações na mesma faixa daquelas encontradas no meio ambiente, e, portanto, dado que a ametrina é amplamente usada na cultura canieira, uma avaliação detalhada de risco deve ser realizada com base no monitoramento de parâmetros subletais e de longo prazo que também devem considerar as misturas como cenários.

Clemente et al. (2014b, 2017, 2019) avaliaram diferentes enzimas de biotransformação, estresse oxidativo e/ou acetilcolinesterase (AChE) como biomarcadores em relação aos possíveis efeitos na atividade de enzimas causadas por diferentes NMs, como  $\text{TiO}_2$  NP e OG. Em ambos os casos, as enzimas relacionadas ao estresse oxidativo e a AChE, em especial, mostraram-se sensíveis à exposição ao NM. Uma vez que a acetilcolina (ACh) desempenha um papel crucial nas sinapses do sistema colinérgico, a inibição da AChE pode afetar o equilíbrio e a locomoção dos animais expostos. Clemente et al. (2019) observaram um aumento na atividade locomotora de larvas de zebrafish aos 5 dias de vida expostas ao OG, mas, aos 7 dias de vida, as larvas não apresentaram diferenças significativas na atividade locomotora. Estas observações evidenciam que alguns mecanismos de homeostase compensatória podem estar envolvidos nos efeitos de desenvolvimento observados no zebrafish. A atividade da AChE pode estar relacionada a problemas no desenvolvimento da larva de peixe no tocante à velocidade e à distância percorrida durante os testes (Clemente et al., 2019) ou, ainda, quanto a alterações morfológicas como a cauda encurvada (Luis et al., 2021). O siste-

ma colinérgico pode estar envolvido em alterações morfológicas como a curvatura da cauda de peixe, devido ao desenvolvimento muscular anormal causado pela inibição de atividade da AChE (Pamanji et al., 2015).

### **Biomarcadores Fisiológicos (Reprodução, Teratogenicidade, Desenvolvimento)**

Muitos biomarcadores diferentes podem ser usados para avaliar o desenvolvimento de um organismo, como danos genéticos, aspectos do desenvolvimento físico, maturação de reflexos etc. A exposição materna a agroquímicos durante a fase reprodutiva pode levar a alterações no desenvolvimento de roedores (Castro, 2013a). Consequentemente, é importante realizar a avaliação dos possíveis efeitos da exposição aos agroquímicos em diferentes períodos de desenvolvimento (Castro et al., 1992).

Além de estudos sobre a fertilidade da mãe e a viabilidade do filhote, podem ser realizados testes para avaliação da cito- e genotoxicidade pela exposição ao produto tanto por meio de testes *in vitro* quanto *in vivo* (Castro; Poli, 2013). Assim, a análise cromossômica com ratas expostas a diferentes concentrações do fungicida mancozeb, nos períodos inicial e de organogênese da gestação, mostrou que o dano cromossômico observado em mães e filhotes aumenta com a concentração do fungicida e pode estar relacionado a dano genético e risco teratogênico para a população exposta (Castro et al., 1999b). Ademais, resultados obtidos *in vitro* com leucócitos de duas espécies diferentes de roedores (rato e camundongo) mostram que o fungicida fenarimol afeta o DNA, conforme detectado pelo ensaio de eletroforese em gel de célula única (*single cell gel electrophoresis* – SCGE, ou ensaio Cometa) de forma dose-dependente. Mais ainda, a exposição simultânea de leucócitos de rato ao fenarimol e a um composto genotóxico modelo (bleomicina) produziu um efeito cito- e genotóxico (Poli et al., 2003). Já ratas expostas ao fenarimol durante o início da gestação (1-6 dias), o final da gestação (últimos 6 dias) ou nos primeiros 6 dias de lactação mostraram um efeito genotóxico, detectado pelo ensaio Cometa, tanto em mães quanto em filhotes. A sensibilidade dos animais ao fenarimol parece ser maior durante o período pós-natal. Como o dano ao DNA aumenta durante o tempo de exposição (2 horas a 6 dias após o nascimento), os dados em filhotes sugerem que o fenarimol pode atuar principalmente no DNA celular por meio da exposição direta da ninhada via lactação (Castro et al., 2005).

Outras questões relacionadas à exposição perinatal devem ser consideradas. Assim, foram estudados os efeitos da exposição pré-natal de AgNP sobre os possíveis efeitos e consequências na prenhez de ratas e no desenvolvimento pós-natal da prole. Atualmente, uma possível abordagem para minimizar a perda de alimentos é a utili-

zação de embalagens microbicidas contendo AgNP, por causa de suas propriedades antimicrobianas. A eficácia inibitória microbiana de embalagens contendo NMs é determinada pelo contato do agente antimicrobiano contido na superfície da embalagem com as bactérias. Porém, é importante avaliar se o nível de migração do NM do conteúdo da embalagem para o alimento pode causar toxicidade. No estudo, foram avaliados a duração da gestação (dias), tamanho da ninhada no nascimento, número de filhotes natimortos, número de filhotes mortos durante o período de lactação, peso do embrião e o ganho médio de peso corporal das mães durante o período gestacional. Os resultados não mostraram efeito sobre a duração da gestação, tamanho da ninhada ao nascimento e número de natimortos, tampouco sobre os parâmetros de desenvolvimento físico avaliados nos filhotes. Contudo, os resultados do estudo indicaram que a exposição materna às NPs pode induzir alterações sutis nos parâmetros reprodutivos da prole, como descida dos testículos e abertura vaginal, mesmo em concentrações que não causam mudanças nos parâmetros de desenvolvimento dos filhotes e reprodução materna (Becaro et al., 2021).

Nos últimos anos, em adição aos roedores, o zebrafish (*D. rerio*) tornou-se um organismo modelo popular para estudos toxicológicos com o uso padronizado de fases iniciais da vida na Diretriz 236 da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (teste FET). Nesse contexto, a fim de compreender o papel do dióxido de titânio com MWCNT no meio ambiente, Silva et al. (2018) avaliaram a exposição de embriões de *D. rerio* já que os NMs híbridos podem aumentar a eficácia dos NMs com um único composto. Os resultados não mostraram toxicidade aguda nem efeitos subletais em embriões de *D. rerio* até  $100 \text{ mg L}^{-1}$ , quando a taxa de eclosão e crescimento foram observados.

A taxa de crescimento algácea, parâmetro associado à reprodução celular, também pode ser avaliada. A reprodução algácea pode ser tomada como marcador biológico satisfatório na avaliação de risco e monitoramento de áreas degradadas, especialmente por herbicidas. Em um estudo realizado com a microalga *P. subcapitata*, foi realizada a avaliação da toxicidade de NPs poliméricas de quitosana/tripolifosfato contendo ou não o herbicida paraquat, como também a influência de substâncias húmicas na estabilidade do sistema nanopartícula-herbicida (Grillo et al., 2015). Os resultados demonstraram que substâncias húmicas decrescem os efeitos tóxicos das nanopartículas contendo paraquat. Também foi observado que o valor de  $CE_{50}^{-96h}$  do herbicida incluído na nanopartícula ( $CE_{50}^{-96h} = 1,15 \text{ mg L}^{-1}$ ) foi significativamente superior ao do herbicida isolado ( $CE_{50}^{-96h} = 0,48 \text{ mg L}^{-1}$ ), o que corresponde a uma menor toxicidade na primeira situação. Estes resultados são importantes para a compreensão da interação de nanoestruturados com as espécies presentes em ecossistemas aquáticos e com as substâncias húmicas que influenciam os efeitos adversos de agroquímicos.

## Biomarcadores Fisiológicos (Comportamento)

O uso de indicadores específicos pode verificar a validade de um modelo utilizado na correlação entre sua medida e a exposição real. Na maioria das vezes, a toxicidade e, em especial, a neurotoxicidade ocasionadas pela exposição a substâncias tóxicas são avaliadas de acordo com algumas baterias de testes. Estes podem ser realizados pela avaliação de alterações de funções cognitivas – como aprendizagem e memória – e comportamentais, com a realização de protocolos experimentais em animais de laboratório. As respostas que envolvem atividade e comportamento são estudadas no contexto de exploração e aprendizagem, memória, novidade e ansiedade. Na dependência do estágio de desenvolvimento do organismo, a utilização de um protocolo experimental contendo índices relacionados à reprodução e ao desenvolvimento animal pode identificar danos comportamentais iniciais devido à exposição a poluentes ambientais. Contudo, o conhecimento da qualidade dos dados auxilia na correta interpretação dos efeitos potenciais da exposição a um poluente químico e abre perspectivas de seu uso na saúde pública (Castro; Silva, 2009).

Um crescente número de evidências sugere que as habilidades de aprendizagem motora são indicadores confiáveis de aquisição comportamental e distúrbios cognitivos e contribuem para estabelecer a extensão potencial desses efeitos cognitivos no neurodesenvolvimento. Nesse sentido, os modelos animais são essenciais para melhorar a compreensão dos mecanismos neuronais subjacentes à exposição aos poluentes. De fato, numerosos estudos demonstraram que os efeitos neurotóxicos agudos observados em modelos pré-clínicos de intoxicação aguda com organofosforados (OP) (Guignet et al., 2020) são amplamente replicados em modelos de intoxicação aguda com roedores.

De fato, a exposição a agroquímicos pode levar a possíveis alterações comportamentais inclusive durante a exposição materna. Por conseguinte, a avaliação dos possíveis efeitos decorrentes da exposição aos agroquímicos é importante de ser realizada em diferentes períodos do desenvolvimento, especialmente naqueles considerados críticos devido à possível influência na morfologia e na fisiologia do sistema nervoso (Castro et al., 2000a, 2000b; Castro; Maia, 2012). Assim, por exemplo, foram observados alguns déficits neuromusculares e comportamentais em filhotes devido à exposição materna ao fungicida fenarimol. As alterações nos filhotes podem ocorrer principalmente durante o último período gestacional e a lactação (Castro et al., 2007a). Além disso, o sulfentrazone pode causar alterações no sistema nervoso do filhote de rato em diferentes estágios de desenvolvimento pós-natal, como evidenciado por alguns atrasos no desenvolvimento de reflexos e coordenação motora (Castro et al., 2007b). Mais ainda, os efeitos da exposição a misturas de agroquímicos podem ser investigados por biomarcadores comportamentais (Castro; Chiorato, 2007).

Assim, a avaliação de efeitos adversos do paclobutrazol – utilizado como fungicida e regulador de crescimento vegetal – na reprodução e no desenvolvimento da ninhada mostrou que ocorreram algumas diferenças nos animais expostos quanto ao estado funcional do sistema nervoso de filhotes de ratos em diferentes estágios do desenvolvimento, mesmo em doses que não causaram toxicidade materna. Nesse sentido, foram observados danos nos filhotes na expressão do reflexo de sobressalto, além de alteração da locomoção observada em uma arena de campo aberto. Contudo, não foram observadas alterações no comportamento de natação. Estes dados fornecem subsídios para estudos adicionais sobre os efeitos potencialmente tóxicos que a exposição das mães a esse pesticida pode ocasionar em suas ninhadas (Castro et al., 2004).

Os biomarcadores comportamentais ainda podem ser usados em uma grande variedade de objetivos experimentais. Dessa forma, alterações comportamentais, como aquelas observadas em testes de tarefas motoras e exploratórias, podem ser observadas devido à subnutrição, refletindo a maturação atrasada de estruturas responsáveis pelas respostas sensorio-motoras, como o cerebelo, pois grande parte da maturação cerebelar ocorre após o nascimento (Barbosa et al., 2016).

Alguns ensaios comportamentais também permitem a análise e caracterização de paralelos entre espécies, gerando achados valiosos para estudos evolutivos e comparativos. Essas ferramentas avaliam comportamentos que são conservados em modelos animais como zebrafish e roedores. O zebrafish (*D. rerio*) pode ser usado para estudar e modelar a toxicidade de eventos, desde modificações em nível celular até mudanças no fenótipo, incluindo alterações no crescimento e desenvolvimento ou comportamento. O aumento da utilização e padronização de ensaios comportamentais em peixes adultos fornece resultados de alta qualidade e demonstra possíveis alterações funcionais da exposição aos xenobióticos (Figura 14.5).

Estes biomarcadores comportamentais podem ser usados também para auxiliar a avaliação do emprego de polímeros naturais na nanoencapsulação de nutrientes para uso na aquicultura (Luis et al., 2021).

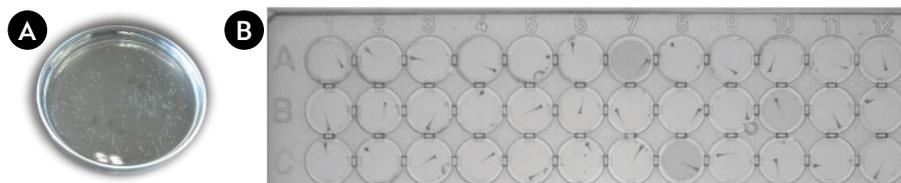


Figura 14.5. (A) Larvas de zebrafish; (B) Avaliação comportamental da larva de forma individual.

Em termos de neurotoxicidade, o zebrafish fornece um modelo poderoso para investigar mudanças no sistema nervoso devido à exposição a vários compostos, oferecendo a capacidade de estudar seus mecanismos de ação (Fitzgerald et al., 2021). Nesse contexto, a exposição a NMs, como o OG, foi capaz de induzir alterações não só bioquímicas e morfológicas, mas também comportamentais, em larvas de zebrafish (Clemente et al., 2019).

## ASPECTOS DE BIOACUMULAÇÃO NOS ORGANISMOS

Bioacumulação é um processo frequente em compartimentos aquáticos pelo qual compostos químicos são absorvidos pelos organismos de forma direta a partir do ambiente (solo, sedimento, água), ou de forma indireta, pela ingestão de alimentos que contêm esses compostos. Estes devem possuir uma certa lipossolubilidade para serem retidos nos tecidos do organismo e permitir que a sua taxa de absorção e armazenamento seja mais elevada que a de excreção.

A bioacumulação ocorre quando a velocidade de absorção de um composto excede sua velocidade de eliminação, resultando em acúmulo no organismo. Enquanto a bioacumulação é a ingestão de uma substância química e sua concentração no organismo por todos os meios possíveis, incluindo contato, respiração e ingestão, a bioconcentração é a ingestão e retenção de uma substância em um organismo inteiro pela respiração através da água (em ecossistemas aquáticos), ou do ar (em ecossistemas terrestres). Por outro lado, a biomagnificação ocorre quando o produto químico passa pela cadeia alimentar para níveis tróficos mais elevados, de modo que, em predadores, excede a concentração esperada para o equilíbrio entre um organismo e seu ambiente (Alexander, 1999).

A bioconcentração é a forma mais direta de avaliar o acúmulo de substâncias em organismos aquáticos. É um fenômeno importante para observar a manifestação de efeitos subletais do composto em organismos não-alvo e para prevenir a contaminação de organismos aquáticos utilizados como alimentos para o consumo humano. É estimada pelo fator de bioconcentração (FBC), que é a relação entre a concentração da substância no tecido do organismo (Co) e a concentração na água (Ca), quando for atingido o equilíbrio aparente durante a fase de acúmulo do composto. Entretanto, este fator pode também ser calculado pela relação da constante de assimilação pela constante de eliminação. A avaliação da bioconcentração é importante para calcular parâmetros da cinética do produto e compará-los com outros compostos e outras espécies, além de contrastar seu acúmulo no organismo com os valores de Ingestão Diária Aceitável (IDA) propostos pela Organização Mundial da Saúde. Por meio dos ensaios de avaliação da bioconcentração, pode-se também estudar a redução do composto nos tecidos do organismo quando cessa a exposição e calcular o tempo de de-

pleção de resíduos para atingir níveis no produto alimentar que estejam de acordo com a legislação vigente.

Em um estudo com o fungicida e regulador de crescimento vegetal paclobutrazol, estudou-se sua bioconcentração no peixe pacu prata (*Metynnis argenteus*) (Jonsson et al., 2002). Ao final da exposição (28º dia), a concentração de paclobutrazol determinada em músculo atingiu níveis residuais de 166 mg kg<sup>-1</sup> para a concentração média de 2,7 mg L<sup>-1</sup> determinada na água. O FBC estimado para o paclobutrazol na situação de equilíbrio foi equivalente a 73, classificando-o como “medianamente bioconcentrável”. De acordo com valor estimado de FBC, e com o valor da IDA para o paclobutrazol de 0,1 mg kg<sup>-1</sup> de peso corpóreo, a concentração máxima permitida do ingrediente ativo em corpos d’água para evitar efeitos adversos quanto ao consumo do peixe seria equivalente a 0,2 mg L<sup>-1</sup>. Este valor foi estimado com base na concentração na água que seria atingida pela aplicação direta da dose máxima recomendada do paclobutrazol (3,0 kg i.a. ha<sup>-1</sup>) sobre uma lâmina de água de 150 cm e considerando-se o consumo diário de 500 g de peixe por um indivíduo adulto de 70 kg.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos ecotoxicológicos estão focados no aprimoramento e desenvolvimento de novos métodos para avaliar o impacto da toxicidade dos poluentes em organismos vivos e ecossistemas. A toxicidade dos xenobióticos e dos contaminantes emergentes tem estimulado o desenvolvimento de métodos e o aprimoramento de procedimentos analíticos capazes de avaliar seus efeitos biológicos. Embora as respostas dos biomarcadores possam ser difíceis de interpretar, a integração de suas várias medidas pode sinalizar inequivocamente um dano.

Nesse contexto, a qualidade ambiental poderá ser melhor avaliada através do biomonitoramento com o uso de animais-sentinela em conjunto com o desenvolvimento de biomarcadores moleculares. Para tanto, os métodos de proteômica oferecem uma abordagem atraente para o estudo das respostas moleculares iniciais dos organismos aos estressores ambientais. Esta abordagem poderá ser usada para identificar as vias de toxicidade, quantificar mais precisamente os novos biomarcadores e traçar as possíveis vias de resultados adversos (Gouveia et al., 2019).

Levando em consideração a necessidade de realizar esforços para melhor compreender as propriedades toxicológicas e ecotoxicológicas dos poluentes ambientais e o papel dos organismos nos processos de transferência de poluentes, o fornecimento de dados sob uma perspectiva abrangente e integrada torna-se uma importante contribuição para a promulgação de normas de proteção ao meio ambiente. Portanto, terá importância crescente a cooperação interdisciplinar de pesquisadores e profissionais atuantes (físicos, químicos, biólogos, farmacêuticos etc.) com o objetivo de alcançar

uma melhor compreensão dos complexos mecanismos que regulam a transferência e atividade de poluentes e seus efeitos sobre diferentes organismos-alvo.

Uma vez que os testes ecotoxicológicos permitem avaliar a atividade de substâncias em diferentes níveis, seus resultados têm o potencial de direcionar controles, regulamentos, leis e outras atividades destinadas a preservar o ambiente, além de possibilitar a articulação dos diversos setores públicos e privados relacionados à saúde ambiental. Os resultados obtidos com o uso de bioindicadores podem contribuir para o estabelecimento de limites máximos permissíveis de xenobióticos no compartimento aquático e, em consequência, para políticas públicas no Brasil.

Assim, espera-se que as ações geradas pelos resultados obtidos a partir de novos estudos contribuam para a produção e compilação de um conjunto de dados que servirá para auxiliar futuramente a análise dos possíveis efeitos tóxicos causados pelos agroquímicos junto aos órgãos reguladores.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, F. P. de; OLIVEIRA, J. L. de; MACHADO, L. dos S.; RICHARDI, V. S.; SILVA, M. A. N. da; POMPEO, M. L. M.; FRACETO, L. F.; CARLOS, V. M. Use of nontarget organism *Chironomus sancticaroli* to study the toxic effects of nanoatrazine. *Ecotoxicology*, v. 30, p. 733-750, 2021.
- ALBUQUERQUE, F. P. de; PREISLER, A. C.; FRACETO, L. F.; OLIVEIRA, H. C.; CASTRO, V. L. S. S. de. Overview of nanopesticide environmental safety aspects and regulatory issues: the case of nanoatrazine. In: FRACETO, L. F.; CASTRO, V. L. S. S. de; GRILLO, R.; ÁVILA, D.; OLIVEIRA, H. C.; LIMA, R. de (ed.). **Nanopesticides: from research and development to mechanisms of action and sustainable use in agriculture**. Cham: Springer, 2020. p. 281-298.
- ALEXANDER, D. E. Bioaccumulation, bioconcentration, biomagnification. In: **ENVIRONMENTAL Geology: Encyclopedia of Earth Science**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999. p. 43-44.
- BARBOSA, D. S. **Análise da interação entre substâncias húmicas e xenobióticos através de estudos ecotoxicológicos: proposta para a geração de tecnologias de detoxificação aquática**. 2008. 109 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- BARBOSA, E. H.; VALLIM, J. H.; LACHAT, J. J.; CASTRO, V. L. S. S. de. Assessments of motor abnormalities on the grid-walking and foot-fault tests from undernutrition in wistar rats. *Journal of Motor Behavior*, v. 48, n. 1, p. 5-12, 2016.
- BASU, P.; PAL, A. Spatio-temporal analysis of development of basal roots of common bean (*Phaseolus vulgaris L.*). *Plant Signaling and Behavior*, v. 6, n. 7, p. 982-985, 2011.
- BAUTISTA, O. V.; FISCHER, G.; CARDENAS, J. F. Cadmium and chromium effects on seed germination and root elongation in lettuce, spinach and Swiss chard. *Agronomía Colombiana*, v. 31, p. 48-57, 2013.
- BECARO, A. A.; OLIVEIRA, L. P. de; CASTRO, V. L. S. S. de; SIQUEIRA, M. C.; BRANDAO, H. de M.; CORREA, D. S.; FERREIRA, M. D. Effects of silver nanoparticles prenatal exposure on rat offspring development. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, v. 81, article 103546, 2021.
- BLAISE, C.; GAGNÉ, F.; HARWOOD, M.; QUINN, B.; HANANA, H. Ecotoxicity responses of the freshwater cnidarian *Hydra attenuata* to 11 rare earth elements. *Ecotoxicology. And Environmental Safety*, v. 163, p. 486-491, 2018.
- BONANI, F. **Avaliação de deformidades morfológicas em larvas de *Chironomus* (Diptera, Chironomidae) na bacia do rio Piracicaba e sua aplicação no biomonitoramento**. 2010. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências Biológicas e da Saúde. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- BRAIN, R. A.; SOLOMON K. R. A protocol for conducting 7-day daily renewal tests with Lemna gibba. *Nature Protocols*, v. 2, n. 4, p. 979-987, 2007.
- BURTON JUNIOR, A. G.; BAUDO, R.; BELTRAMI, M.; ROWLAND, K. Assessing sediment contamination using six toxicity assays. *Journal of Limnology*, v. 60, n. 2, p. 263-267, 2001.
- CASTRO, V. L. S. S. de. Aspectos da exposição ambiental aos agroquímicos e a avaliação de seus efeitos no desenvolvimento animal. *Cadernos de Ciência e Tecnologia*, v. 21, n. 3, p. 469-497, 2004.

CASTRO, V. L. S. S. de. Neurotoxicants: developmental experimental testing. In: JORGENSEN S. E. (ed.). **Encyclopedia of Environmental Management**. New York: Taylor & Francis: 2013a. v. III, p. 1777-1782.

CASTRO, V. L. S. S. de. **Uso de animais de experimentação e legislação correlata: orientações sobre estudos com peixes e roedores**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2013b. 27 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 94).

CASTRO, V. L. S. S. de; BERNARDI, M. M.; PALERMO-NETO, J. Evaluation of prenatal aldrin intoxication in rats. **Archives of Toxicology**, v. 66, p. 149-152, 1992.

CASTRO, V. L. S. S. de; CHIORATO, S. Evaluation of pesticides mixtures effects on the development of suckling rats. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 210, n. 2, p. 169-176, 2007.

CASTRO, V. L. S. S. de; CHIORATO, S.; PINTO, N. Biological monitoring of embryo-fetal exposure to methamidophos or chlorothalonil on rat development. **Veterinary and Human Toxicology**, v. 42, n. 6, p. 361-365, 2000b.

CASTRO, V. L. S. S. de; CHIORATO, S.; PINTO, N. Relevance of developmental testing of exposure to methamidophos during gestation to its toxicology evaluation. **Toxicology Letters**, v. 118, n. 1-2, p. 93-102, 2000a.

CASTRO, V. L. S. S. de; CLEMENTE, Z.; JONSSON, C. M.; SILVA, M. S. G. M. e; VALLIM, J. H.; MEDEIROS, A. M. Z. de; MARTINEZ, D. S. T. Nanoeotoxicity assessment of graphene oxide and its relationship with humic acid. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 37, W 7, p. 1998-2012, 2018.

CASTRO, V. L. S. S. de; DESTEFANI, C. R.; DINIZ, C. A. R.; POLI, P. Evaluation of neurodevelopmental effects on rats exposed prenatally to sulfentrazone. **Neurotoxicology**, v. 28, n. 6, p. 1249-1259, 2007b.

CASTRO, V. L. S. S. de; GOES, K. P.; CHIORATO, S. H. Developmental toxicity potential of paclobutrazol in the rat. **International Journal of Environmental Health Research**, London, v. 14, n. 5, p. 371-380, out. 2004.

CASTRO, V. L.; JONSSON, C. M. Proposta conceitual de estudo para a integração e gerenciamento do uso de marcadores bioquímicos de contaminação ambiental. **Biotemas**, v. 25, n. 1, p. 159-170, 2012

CASTRO, V. L. S. S. de; MAIA, A. de H. N. Prenatal epoxiconazole exposure effects on rat postnatal development. **Birth Defects Research. Part B. Developmental and Reproductive Toxicology**, v. 95, p. 123-129, 2012.

CASTRO, V. L. S. S. de; MELLO, M. A. de; DINIZ, C. A. R.; MORITA, L. H. M.; ZUCCHI, T.; POLI, P. Neurodevelopmental effects of perinatal fenarimol exposure on rats. **Reproductive Toxicology**, v. 23, n. 1, p. 98-105, 2007a.

CASTRO, V. L. S. S. de; MELLO, M. A. de; POLI, P.; ZUCCHI, T. M. A. D. Prenatal and perinatal fenarimol-induced genotoxicity in leukocytes of in vivo treated rats. **Mutation Research**, v. 583, v. 1, p. 95-104, 2005.

CASTRO, V. L. S. S. de; POLI, P. Pollution: genotoxicity of agrototoxic compounds. In: JORGENSEN S. E. (ed.). **Encyclopedia of Environmental Management**. New York: Taylor & Francis, 2013. v. III, p. 2147-2159.

CASTRO, V. L. S. S. de; SILVA, P. A. Validation of neurobehavioral studies for evaluating the perinatal effects of single and mixture exposure to pesticides. In: KANZANTZAKIS, C. M. (ed.). **Progress in pesticides research**. New York: Nova Science Publishers, 2009. p. 371-395

- CASTRO, V. L. S. S. de; SILVEIRA, M.; PEREZ, M. Application of clinical indicators of exposition in the evaluation of family agriculture health: the Sumaré case – Brazil. **The International Journal of Sustainable Development and World Ecology**, v. 6, n. 3, p. 172-184, 1999a.
- CASTRO, V. L. S. S. de; TAMBASCO, A. J.; PARAIBA, L. C.; TAMBASCO, D. D. Cytogenetic and teratological effects of mancozeb pre natal exposure on rats. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 42, n. 2, p. 127-134, 1999b.
- CETESB. KUHLMANN, M. L.; FORNASARO, G. J.; OGURA, L. L.; IMBIMBO, H. R. V. Protocolo para o bio-monitoramento com as comunidades bentônicas de rios e reservatórios do estado de São Paulo. São Paulo: CETESB, 2012. 113 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2013/11/protocolo-biomonitoramento-2012.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2021.
- CLEMENTE, Z.; CASTRO, V. L. S. S. de; FEITOSA, L. O.; LIMA, R.; JONSSON, C. M.; MAIA, A. de H. N.; FRACETO, L. F. Fish exposure to nano-TiO<sub>2</sub> under different experimental conditions: methodological aspects for nanoecotoxicology investigations. **Science of the Total Environment**, v. 463-464, p. 647-656, 2013.
- CLEMENTE, Z.; CASTRO, V. L. S. S. de; FEITOSA, L. O.; LIMA, R.; JONSSON, C. M.; MAIA, A. de H. N.; FRACETO, L. F. Biomarker evaluation in fish after prolonged exposure to nano-TiO<sub>2</sub>: influence of illumination conditions and crystal phase. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v. 15, n. 7, p. 5424-5433, 2015.
- CLEMENTE, Z.; CASTRO, V. L. S. S. de; JONSSON, C. M.; FRACETO, L. F. Minimal levels of ultraviolet light enhance the toxicity of TiO<sub>2</sub> nanoparticles to two representative organisms of aquatic systems. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 16, n. 8, article 2259, 2014a.
- CLEMENTE, Z.; CASTRO, V. L. S. S. de; MOURA, M. A. M.; JONSSON, C. M.; FRACETO, L. F. Toxicity assessment of TiO<sub>2</sub> nanoparticles in zebrafish embryos under different exposure conditions. **Aquatic Toxicology**, v. 147, p. 129-139, 2014b.
- CLEMENTE, Z.; CASTRO, V. L. S. S. de; JONSSON, C. M.; FRACETO, L. F. Ecotoxicology of nano-TiO<sub>2</sub>: an evaluation of its toxicity to organisms of aquatic ecosystems. **International Journal of Environmental Research**, v. 6, n. 1, p. 33-50, 2012.
- CLEMENTE, Z.; CASTRO, V. L. S. S. de; FRANQUI, L.; SILVA, C. A.; MARTINEZ, D. S. T. Nanotoxicity of graphene oxide: assessing the influence of oxidation debris in the presence of humic acid. **Environmental Pollution**, v. 225, p. 118-128, 2017.
- CLEMENTE, Z.; SILVA, G. H. da; NUNES, M. C. S.; MARTINEZ, D. S. T.; MAURER-MORELLI, C. V.; THOMAZ, A. A.; CASTRO, V. L. S. S. de. Exploring the mechanisms of graphene oxide behavioral and morphological changes in zebrafish. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 29, p. 30508-30523, 2019.
- CÔA, F.; STRAUSS, M.; CLEMENTE, Z.; RODRIGUES NETO, L. L.; LOPES, J. R.; ALENCAR, R. S.; SOUZA FILHO, A. G.; ALVES, O. L.; CASTRO, V. L. S. S. de; BARBIERI, E.; MARTINEZ, D. S. T. Coating carbon nanotubes with humic acid using an eco-friendly mechanochemical method: Application for Cu(II) ions removal from water and aquatic ecotoxicity. **Science of the Total Environment**, v. 607-608, p. 1479-1486, 2017.
- DURÁN, N.; MARTINEZ, D. S. T.; JUSTO, G. Z.; LIMA, R. de; CASTRO, V. L. S. S. de; UMBUZEIRO, G. de A.; BARBIERI, E.; DURÁN, M.; MELO, P. da S.; ALVES, O. L.; FÁVARO, W. J. Interlab study on nanotoxicology of representative graphene oxide. **Journal of Physics**, v. 617, p. 1-9, 2015. Edition of the

proceedings 4th International Conference on Safe Production and Use Nanomaterials (Nanosafe 2014) 18-20 November 2014, held a Grenoble, France.

FENWICK, N.; GRIFFIN, G.; GAUTHIER, C. The welfare of animals used in science: ow the “Three Rs” ethic guides improvements. *The Canadian Veterinary Journal*, v. 50, n. 5, p. 523-530, 2009.

FITZGERALD, J. A.; KÖNEMANN S.; KRÜMPELMANN, L.; ŽUPANIC, A.; VOM BERG, C. Approaches to test the neurotoxicity of environmental contaminants in the Zebrafish model: from behavior to molecular mechanisms. *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 40, n. 4, p. 989-1006, 2021

FÖRSTNER, U. Geochemical techniques on contaminated sediments-river basin view. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 10, p. 58-68, 2003.

FÖRSTNER, U. Traceability of sediment analysis. *Trends in Analytical Chemistry*, v. 23, n. 3, p. 217-236, 2004.

GONÇALVES, S. P. C.; STRAUSS, M.; DELITE, F. S.; CLEMENTE Z.; CASTRO, V. L. S. S. de; MARTINEZ D. S. T. Activated carbon from pyrolysed sugarcane bagasse: Silver nanoparticle modification and ecotoxicity assessment. *Science of the Total Environment* v. 565, p. 833-840, 2016

GOUVEIA, D.; ALMUNIA, C.; COGNE, Y.; PIBLE, O.; DEGLI-ESPOSTI, D.; SALVADOR, A.; CRISTOBAL, S.; SHEEHAN, D.; CHAUMOT, A.; GEFFARD, O.; ARMENGAUD, J.; Ecotoxicoproteomics: a decade of progress in our understanding of anthropogenic impact on the environment, *Journal of Proteomics*, v. 198, p. 66-77, 2019.

GRILLO, R.; CLEMENTE, Z.; OLIVEIRA, J. L. de; CAMPOS, E. V. R.; CHALUPE, V. C.; JONSSON, C. M.; LIMA, R.; SANCHES, G.; NISHISAKA, C. S.; ROSA, A. H.; OEHLKE, K. Chitosan nanoparticles loaded the herbicide paraquat: the influence of the aquatic humic substances on the colloidal stability and toxicity. *Journal of Hazardous Materials*, v. 286, p. 562-572, 2015.

GUIGNET, M.; DHAKAL, K.; FLANNERY, B. M.; HOBSON, B. A.; ZOLKOWSKA, D.; DHIR, A.; BRUUN, D. A.; LI, S.; WAHAB, A.; HARVEY, D. J.; SILVERMAN, J. L.; ROGAWSKI, M. A.; LEIN, P. J. Persistent behavior deficits, neuroinflammation, and oxidative stress in a rat model of acute organophosphate intoxication. *Neurobiology of Disease*, v. 133, article 104431, 2020.

HANNAS, B. R.; DAS, P. C.; LI, H.; LeBLANC, G. A. Intracellular conversion of environmental nitrate and nitrite to nitric oxide with resulting developmental toxicity to the crustacean *Daphnia magna*. *PLOS One*, v. 5, n. 8, el2453, 2010.

HECKMAN, L.; SUTHERLAND, D. S.; BESENBACHER, F.; HOVGAARD, M. B.; AUTRUP, H.; SCOTT-FORDSMAN, J. J. Limit-test toxicity screening of selected inorganic nanoparticles to the earthworm *Eisenia fetida*. *Ecotoxicology*, v. 20, p. 226-233, 2011.

IOWA STATE UNIVERSITY. Department of Plant Pathology, Entomology, and Microbiology. **BugGuide**. Plymouth Rock, 2011. Disponível em: <https://bugguide.net/node/view/546717>. Acesso em: 12 maio 2023.

JACQUES, M. T.; OLIVEIRA, J. L.; CAMPOS, E. V. R.; FRACETO, L. F.; ÁVILA, D. S. Safety assessment of nanopesticides using the roundworm *Caenorhabditis elegans*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 139, p. 245-253, 2017.

- JONSSON, C. M.; SILVA, M. S. G. M. e; MACEDO, V. S. de; DANTZGER, D. D.; VALLIM, J. H.; MARIGO, A. L. S.; AOYAMA, H. Prediction of a low-risk concentration of diflubenzuron to aquatic organisms and evaluation of clay and gravel in reducing the toxicity. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 10, n. 4, p. 259-272, 2015.
- JONSSON, C. M.; FERRACINI, V. L.; PARAIBA, L. C.; RANGEL, M.; AGUIAR, S. R. Alterações bioquímicas e acúmulo em pacus (*Metynnis argenteus*) expostos ao paclobutrazol. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 3, p. 441-446, 2002
- KOPP, R.; LEGLER, J.; LEGRADI, J. Alterations in locomotor activity of feeding zebrafish larvae as a consequence of exposure to different environmental factors. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 5, p. 4085-4093, 2018.
- KUHLMANN, M. L.; HAYASHIDA C. Y.; ARAÚJO, R. P. A. Using Chironomus (Chironomidae: Diptera) mentum deformities in environmental assessment. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 12, n. 1, p. 55-61, 2000.
- LORENZ, M. SAG 61.81 *Raphidocelis subcapitata*. Göttingen: Georg August Universität, Department Experimental Phycology and Culture Collection of Algae, 2016. Disponível em: [https://sagdb.uni-goettingen.de/detailedList.php?str\\_number=61.81](https://sagdb.uni-goettingen.de/detailedList.php?str_number=61.81). Acesso em: 12 maio 2023.
- LUIS, A. I. S.; CAMPOS, E. V. R.; OLIVEIRA, J. L. de; GUILGER-CASAGRANDE, M.; LIMA, R. de; CASTANHA, R. F.; CASTRO, V. L. S. S. de; FRACETO, L. F. Zein nanoparticles impregnated with eugenol and garlic essential oils for treating fish pathogens. **ACS Omega**, v. 5, n. 25, p. 15557-15566, 2020.
- LUIS, A. I. S.; CAMPOS, E. V. R.; OLIVEIRA, J. L. de; VALLIM, J. H.; PROENÇA, P. L. de F.; CASTANHA, R. F.; CASTRO, V. L. S. S. de; FRACETO, L. F. Ecotoxicity evaluation of polymeric nanoparticles loaded with ascorbic acid for fish nutrition in aquaculture. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 19, n. 1, article 163, 2021. p. 1-22.
- MACKLIN, M. G.; BREWER P. A.; HUDSON-EDWARDS, K. A.; BIRD, G.; COULTHARD, T. J.; DENNIS, I. A.; LECHLER, P. J.; MILLER, J. R.; TURNER, J. N. A geomorphological approach to the management. **Geomorphology**, v. 79, n. 3-4, p. 423-447, 2006.
- MCCARTY, L. S.; MUNKITTRICK, K. R. Environmental biomarkers in aquatic toxicology: fiction, fantasy, or functional? **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v. 2, n. 2, p. 268-274, 1996.
- MEDEIROS, A.; KHAN, L. U.; SILVA, G. H. da; OSPINA, C. A.; ALVES, O. L.; CASTRO, V. L. S. S. de; MARTINEZ, D. S. T. Graphene oxide-silver nanoparticles hybrid material: an integrated nanosafety study in zebrafish embryos. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 209, article 111776, 2021.
- MOURA, M. A. M., OLIVEIRA, R.; JONSSON, C. M.; DOMINGUES, I.; SOARES, A. M. V. M.; NOGUEIRA, A. J. A. The sugarcane herbicide ametryn induces oxidative stress and developmental abnormalities in zebrafish embryos. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 14, p. 13416-13425, 2018.
- MURPHY, F.; QUINN, B. The effects of microplastic on freshwater *Hydra attenuata* feeding, morphology and reproduction. **Environmental Pollution**, v. 234, p. 487-494, 2018.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **OECD Guideline for Testing of Chemicals. Fish Embryo Toxicity (FET) Test**. Paris, 2006.
- ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Test No.203: fish, acute toxicity test**. Paris, 1992. (OECD Guidelines for the Testing of Chemicals).

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Test No.236:** Fish embryo acute toxicity (FET) test. Paris, 2013. (OECD Guidelines for the Testing of Chemicals).

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. **Biomarkers and risk assessment: concepts and principles.** Vammala, 1993. 82 p.

PAMANJI, R.; YASHWANTH, B.; BETHU, M. S.; LEELAVATHI, S.; RAVINDER, K.; VENKATESWARA, R. J. Toxicity effects of profenofos on embryonic and larval development of Zebrafish (*Danio rerio*). **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 39, n. 2, p. 887-897, 2015.

PARAIBA, L.; CASTRO, V.; MAIA, A. Insecticide distribution model in human tissues viewing worker's health monitoring programs. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 52, n. 4, p. 875-882, 2009

PARK, S.; CHOI, J. Genotoxic effects of nonylphenol and bisphenol A exposure in aquatic biomonitoring species: Freshwater crustacean, *Daphnia magna*, and aquatic midge, *Chironomus riparius*. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 83, n. 4, p. 463-468. 2009.

PARKER, M. O. Adult vertebrate behavioural aquatic toxicology: reliability and validity. **Aquatic Toxicology**, v. 170, p. 323-329, 2016.

PEREIRA, F. F.; FERREIRA, M. D.; JONSSON, C. M.; JESUS K. R. E. de; CASTRO, V. L. S. S. de; CORREA, D. S. Toxicity of engineered nanostructures in aquatic environments. In: KUMAR, V.; GULERIA, P.; RANJAN, S.; DASGUPTA, N.; LICHTFOUSE, E. (ed.). **Nanotoxicology and nanoecotoxicology: vol. I: environmental chemistry for a sustainable world.** Cham: Springer, 2021. p. 171-202.

POLI, P.; MELLO, M. A.; BUSCHINI, A.; CASTRO, V. L. S. S. de; RESTIVO, F.; ROSSI, C.; ZUCCHI, T. Evaluation of the genotoxicity induced by the fungicide fenarimol in mammalian and plant cells by use of the single-cell gel electrophoresis assay. **Mutation Research: Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis**, v. 540, p. 57-66, 2003.

POLITZ, S. M.; PHILIPP, M. *Caenorhabditis elegans* as model for parasitic nematodes: A focus on the cuticle. **Parasitology Today**, v. 8, n. 1, p. 6-12, 1992.

PRADHAN, S.; MAILAPALLI, D. R. Interaction of engineered nanoparticles with the agri-environment. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 38, p. 8279-8294, 2017.

PRESTES, E. B.; JONSSON, C. M.; CASTRO, V. L. S. S. de. Avaliação da toxicidade de piraclostrobin, epoxiconazol e sua mistura em alga *Pseudokirchneriella subcapitata*. **Pesticidas**, v. 21, p. 39-46, 2011.

PRESTES, E. B.; JONSSON, C. M.; CASTRO, V. L. S. S. de. Avaliação da toxicidade aguda de piraclostrobin, epoxiconazol e sua mistura em *Daphnia similis*. **Pesticidas**, v. 22, p. 43-50, 2012.

PRESTES, E. B.; JONSSON, C. M.; CASTRO, V. L. S. S. de.; PARAIBA, C. C. M. Avaliação da toxicidade crônica de piraclostrobin, epoxiconazol e sua mistura em *Daphnia similis*. **Ecotoxicology and Environmental Contamination**, v. 8, p. 113-117, 2013.

PUSCEDDU, F. H. **Avaliação ecotoxicológica do fármaco Triclosan para invertebrados de água doce com ênfase em ensaios com sedimento marcado ("spiked sediment")**. 2009. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Universidade de São Paulo, São Paulo.

- SALES, S. C. M. **Reavaliação ecotoxicológica da qualidade da água e do sedimento do reservatório da Pampulha (MG) e seus principais tributários.** 2009. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- SALOMÃO, A. L. S.; HAUSER-DAVIS, R.A.; MARQUES, M. Critical knowledge gaps and relevant variables requiring consideration when performing aquatic ecotoxicity assays. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 203, article 110941, 2020.
- SALOMONS, W.; BRILS, J. **Contaminated sediments in european river basins, Netherlands:** European Sediment Research Network (SedNet). 2004. 80 p.
- SANSEVERINO, A. M.; NESSIMIAN, J. L. Assimetria flutuante em organismos aquáticos e sua aplicação para avaliação de impactos ambientais. **Oecologia brasiliensis**, v. 12, n. 3, p. 382-405. 2008.
- SHUGART, L. R.; MCCARTHY, J. F.; HALBROOK, R. S. Biological markers of environmental and ecological contamination: an overview. **Risk Analysis**, v. 12, n. 3, p. 353-360, 1992.
- SILVA, G. H.; CLEMENTE, Z.; KHAN, L. U.; COA, F.; NETO, L.; CARVALHO, H.; CASTRO, V. L. S. S. de; MARTINEZ, D. S. T.; MONTEIRO, R. Toxicity assessment of TiO<sub>2</sub>-MWCNT nanohybrid material with enhanced photocatalytic activity on *Danio rerio* (Zebrafish) embryos, **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 165, p. 136-143, 2018.
- SILVA, L. A. G. A. da; JONSSON, C. M.; SILVA, M. S. G. M. e. Estudos preliminares sobre o efeito toxicológico de nanopartículas de prata sobre *Chironomus sanctiparoli*. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 13.; 2019, Campinas. **Anais...** Campinas: Instituto Agrônômico, 2019. Artigo 19416.
- SOBRERO, M. C.; RONCO, A. Ensayo de toxicidad aguda con semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.). In: CASTILLO MORALES, G. (ed.) **Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas.** Jiutepec: IMTA, p. 71-79. 2004.
- TESOLIN, G. A. S.; MARSON, M. M.; JONSSON, C. M.; NOGUEIRA, A. J. A.; FRANCO, D. A. S.; ALMEIDA, S. D. B.; MATALLO, M. B.; MOURA, M. A. M. Avaliação da toxicidade de herbicidas usados em cana-de-açúcar para o Paulistinha (*Danio rerio*). **O Mundo da Saúde (Online)**, v. 38, p. 86, 2014.
- WANG, W. Literature review on duckweed toxicity testing. **Environmental Research**, v. 52, n. 1, p. 7-2, 1990.
- YAO, H.; XU, X.; ZHOU, Y.; XU, C. Impacts of isopyrazam exposure on the development of early-life zebrafish (*Danio rerio*). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 24, p. 23799-23808, 2018.
- ZHANG, Y.; MENG, T.; GUO, X.; YANG, R.; SI, X.; ZHOU, J. Humic acid alleviates the ecotoxicity of graphene-family materials on the freshwater microalgae *Scenedesmus obliquus*. **Chemosphere**, v. 197, p. 749-775, 2018.
- ZUCCHI, T. M.; POLI, P.; MELO, M. A.; ZUCCHI, F. D.; ZUCCHI, T. D.; CASTRO, V. L. S. S. de. **Biomarcadores: Sentinelas ambientais.** In: BINSFELD, P. C. (org.). **Biossegurança em Biotecnologia.** Rio de Janeiro: Interciências, 2004. p. 171-184.

# MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO DE RESÍDUOS E CONTAMINANTES EM AMOSTRAS AMBIENTAIS E DE ALIMENTOS

*Vera Lúcia Ferracini, Sonia Cláudia do Nascimento de Queiroz, Cláudio Martín Jonsson, Marcia Regina Assalin, Robson Rolland Monticelli Barizon, Leticia Sayuri Shiroma, Jordana Alves Ferreira, Debora Renata Cassoli de Souza Dutra e Antonio Luiz Cerdeira*

## INTRODUÇÃO

Agrotóxicos têm sido utilizados na agricultura para controlar pragas e doenças, a fim de aumentar a produtividade. Entretanto, o uso abusivo destes produtos pode deixar resíduos no ambiente e causar efeitos adversos aos ecossistemas e aos seres humanos. Além dos agrotóxicos, a presença de resíduos de drogas veterinárias utilizadas na pecuária e contaminantes emergentes (fármacos, hormônios, nanopartículas, microplásticos, dentre outros) são também de grande preocupação e devem ser avaliados. Para determinar os níveis de resíduos e contaminantes em amostras ambientais, que são da ordem de  $\text{mg Kg}^{-1}$  (ou  $\text{mg L}^{-1}$ ) –  $\text{ng Kg}^{-1}$  (ou  $\text{ng L}^{-1}$ ), é necessário o desenvolvimento e a validação de métodos analíticos que sejam confiáveis e sensíveis. De forma geral, as análises de resíduos envolvem as seguintes etapas: extração dos analitos de interesse, remoção dos interferentes da matriz, pré-concentração do extrato, detecção e quantificação por técnicas instrumentais. Para que o método seja considerado confiável e adequado para a finalidade em que será utilizado, há a necessidade de realizar a sua validação utilizando guias fornecidos pelas agências reguladoras nacionais e internacionais, e atingir níveis, sempre que houver, abaixo dos Limites Máximos de Resíduos (LMR) permitidos. Assim, este capítulo descreve uma revisão sobre os principais métodos de extração e técnicas instrumentais (com ênfase nas cromatográficas) utilizadas na determinação de resíduos e contaminantes em amostras ambientais e de alimentos, bem como os protocolos de validação utilizados. Serão incluídas também aplicações dos métodos analíticos desenvolvidos e validados, tais como programas de monitoramento de qualidade de água, estudos de comportamento de xenobióticos no ambiente, estudos ecotoxicológicos (bioconcentração), segurança dos alimentos, dentre outras.

## RESÍDUOS E CONTAMINANTES NO AMBIENTE

### Agrotóxicos

Em geral, o controle de pragas e doenças pré e pós-colheita é feito pelo uso de agrotóxicos (pesticidas, agroquímicos, defensivos fitossanitários ou agrícolas), e está intimamente relacionado com a quantidade e qualidade de alimentos disponíveis para o crescimento da população mundial. A evolução da produção agrícola e a expansão da monocultura, associados ao clima tropical, predominante na agricultura brasileira (na qual o ciclo das pragas não é interrompido pelo frio), têm levado a uma intensificação do uso dos agrotóxicos, e, conseqüentemente, a uma intensa exposição humana a estes compostos, seja de forma ocupacional ou ambiental.

Fatores como os processos de degradação (fotodegradação, biodegradação e hidrólise) e volatilização que ocorrem com os pesticidas, o modo de aplicação e as condições climáticas corroboram não somente com o uso em larga escala, mas também com a disseminação dos pesticidas no ambiente.

O uso indiscriminado e incorreto dos agrotóxicos resulta em significativo impacto econômico, na existência de resíduos destas substâncias em alimentos acima dos limites máximos estabelecidos, na resistência aos pesticidas desenvolvida por insetos e micro-organismos fitopatogênicos, e na contaminação ambiental (ar, solo, águas superficiais e subterrâneas), fatores que podem comprometer a sustentabilidade da agricultura.

Uma vez no ambiente, os contaminantes estão sujeitos a uma combinação de processos que podem afetar seu destino e comportamento no ambiente. A transferência das moléculas de agrotóxicos dos compartimentos terrestres para os compartimentos aquáticos é uma dinâmica constante, principalmente em áreas agrícolas. O uso de diferentes moléculas em elevadas quantidades, a erosão do solo em áreas agrícolas e a adesão destas moléculas no solo são fatores que determinam a intensidade desta transferência. O conhecimento das propriedades químicas e físicas dos contaminantes orgânicos é necessário para prever onde possivelmente encontraremos as maiores concentrações dos agrotóxicos nos diferentes compartimentos ambientais, e assim avaliar os possíveis impactos no ecossistema de destino (Dellamatrice; Monteiro, 2014).

Uma ferramenta que auxilia no uso correto e seguro dos agrotóxicos é o Agrofit, Sistemas de Agrotóxicos Fitossanitários. Trata-se de um banco de dados que reúne informações de uso e aplicação de todos os agrotóxicos registrados no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa). Traz também informações do Ministério da Saúde (Anvisa) e do Ministério do Meio Ambiente (Ibama), e está disponível para consulta pública (<https://agrofit.agricultura.gov.br/>).

## Drogas veterinárias

Dentre os produtos de uso veterinário, os medicamentos ou drogas veterinárias são substâncias utilizadas tanto para a prevenção/tratamento de doenças, como para a promoção de crescimento de animais produtores de alimentos. Embora os benefícios do uso de medicamentos veterinários sejam importantes, os possíveis efeitos em organismos não alvo são extremamente preocupantes. Drogas veterinárias são potencialmente contaminantes por apresentarem efeitos biológicos em baixas concentrações, o que pode resultar em efeitos adversos à saúde humana, surgimento e propagação de parasitas e bactérias resistentes, em particular as de interesse à medicina humana, além de prejuízos ao meio ambiente. A pecuária intensiva representa a principal fonte de contaminação do solo por drogas veterinárias, enquanto atividades relacionadas à aquicultura destacam-se pela contaminação dos corpos aquáticos. Uma vez no ambiente, as drogas veterinárias podem afetar tanto os organismos vivos de vida aquática (bactérias marinhas, algas, crustáceos, peixes, e outros) como terrestres (microrganismos, insetos), além de plantas (Bartikova et al., 2016). Dependendo da espécie, as plantas podem apresentar, frente a drogas veterinárias, tanto fitotoxicidade como podem ser utilizadas na remoção destes contaminantes do ambiente (fitorremediação).

Outro importante aspecto sobre o uso excessivo e indevido de drogas veterinárias é a contaminação de alimentos de origem animal. Uma das maneiras de se garantir que a exposição da população a essas substâncias esteja dentro de níveis aceitáveis é pelo estabelecimento dos limites máximos de resíduos (LMR) de drogas veterinárias nesses alimentos, e, com isso, reduzir os riscos relacionados à saúde pública (Ji et al., 2021). No Brasil a Instrução Normativa nº 51, de 19 de dezembro de 2019, estabelece, entre outros, a lista de limites máximos de resíduos (LMR) de medicamentos veterinários em alimentos de origem animal.

## Contaminantes emergentes

Contaminantes emergentes, ou contaminantes de preocupação emergentes, são compostos químicos que têm sido detectados nos diferentes compartimentos ambientais, e que são predominantemente de origem antrópica, provenientes de efluentes domésticos (fármacos e produtos de higiene pessoal), industriais (bisfenol A, alquilfenóis, bifenilas policloradas, ftalatos, compostos perfluorados e retardantes de chama bromados), atividades agrícolas (pesticidas) e pecuárias (drogas veterinárias), sendo amplamente encontrados nos corpos aquáticos.

Não se trata apenas de novos compostos, mas também de compostos que vêm sendo utilizados há tempo. Mas apenas com o advento de novas técnicas analíticas foi possível a quantificação de tais compostos em valores de  $\mu\text{g L}^{-1}$  ou  $\text{ng L}^{-1}$ . As subs-

tâncias são potencialmente tóxicas, cujo efeito ou presença no meio ambiente ainda são pouco conhecidas, sendo ainda necessários estudos para avaliação de riscos à saúde humana. São compostos que geralmente não estão incluídos em programas de monitoramento da qualidade de rotina pelos órgãos de meio ambiente e saúde, e tampouco são legislados.

No Brasil, apesar do grande número de agrotóxicos registrados no Mapa, e considerando que os pesticidas configuram um importante grupo de contaminantes de preocupação emergente, aproximadamente 30 são incluídos em normativas: Portaria MS nº 2.914/2011, e/ou nas Resoluções CONAMA nº 357/2005 (água superficial) e nº 396/2008 (água subterrânea). Segundo Montagner e colaboradores (2017), inúmeros pesticidas são encontrados em águas superficiais, subterrâneas e tratadas, incluindo 5 dos 8 ingredientes ativos mais vendidos no Brasil durante o ano de 2016: glifosato, 2,4-D, atrazina, carbendazim e imidacloprido, sendo que a atrazina é incluída na lista de substâncias proibidas pela União Europeia. Assim, pesticidas configuram um importante grupo de contaminantes de preocupação emergente.

## MÉTODOS PARA EXTRAÇÃO, LIMPEZA E/OU PRÉ-CONCENTRAÇÃO DOS ANALITOS EM DIFERENTES MATRIZES

### Extração líquido-líquido

A extração líquido-líquido (LLE, do inglês *Liquid Liquid Extraction*) é conhecida como extração por solvente ou partição, técnica empregada para separar um ou mais componentes de uma mistura heterogênea de líquidos, baseada em suas diferentes solubilidades em dois líquidos imiscíveis, normalmente água e um solvente orgânico. Os solventes mais utilizados são: hexano, éter dietílico, diclorometano e clorofórmio. O composto mais hidrofílico se desloca para a fase aquosa, e o mais hidrofóbico para a fase orgânica. A extração consiste em adicionar um solvente orgânico imiscível à amostra em um funil de separação e agitar. Após a separação das fases, recolhe-se o solvente contendo o analito, e o processo é repetido por mais vezes, a fim de aumentar a eficiência de extração (Borges et al., 2015). As vantagens da LLE são a simplicidade do método, baixo custo e possibilidade de utilizar vários tipos de solventes, com ampla faixa de polaridade. Porém possui desvantagens, como ser um processo longo, possibilidade de ter perda do analito durante a extração, formação de emulsões, uso de grandes volumes de amostras e de solventes tóxicos, e dificuldade na automação (Queiroz et al., 2001).

## Extração em fase sólida

A extração em fase sólida (SPE) é uma das técnicas de extração mais utilizadas hoje em dia. Nela, os analitos de interesse presentes em uma amostra aquosa são extraídos, com os compostos interferentes, após passarem por um cartucho contendo um material retido/empacotado, denominado sorvente, entre dois filtros. Um sorvente orgânico seletivo é geralmente utilizado para remover os interferentes, e outro sorvente é usado para lavar os analitos de interesse.

Esta técnica de extração foi desenvolvida em meados da década de 1970 (Lanças, 2004), baseando-se em uma técnica de separação líquido-sólido que utiliza mecanismos de separação da cromatografia líquida de baixa pressão. Desta forma, a coluna contendo a fase sólida (sorvente) realiza a separação quando a solução colocada no cartucho é aspirada utilizando-se um pequeno vácuo. Após a drenagem do líquido da amostra, o analito retido no cartucho é extraído em sorvente submetido para posterior análise por técnicas cromatográficas instrumentais, como a Cromatografia Líquida de Alta Eficiência ou Cromatografia Gasosa. É importante ressaltar que a SPE pode ser facilmente automatizada e tem a capacidade de extrair muitas amostras simultaneamente. As etapas envolvidas na SPE incluem: (1) ativação e condicionamento do cartucho, (2) adição da amostra, (3) remoção dos interferentes e (4) eluição do analito, que pode estar na concentração adequada para detecção ou quantificação, ou, se não estiver, deve se adicionar uma etapa de concentração. Os mecanismos envolvidos na separação podem ser: (a) adsorção; (b) partição (fase normal e fase reversa); (c) troca iônica; (d) exclusão por tamanho (Lanças, 2004).

## Micro extração em fase sólida

O sistema de micro extração em fase sólida (SPME) foi desenvolvido por Pawliszyn e Arthur (1990) no início da década de 1990, e baseia-se na adsorção dos analitos em uma fibra de sílica coberta com uma camada de sorvente. O dispositivo básico de SPME consiste em um bastão de fibra ótica de sílica fundida (FS) de 100 mm de diâmetro, com 10 mm de uma extremidade recoberta com um filme fino de um polímero, isto é, poli-dimetilsiloxano (PDMS) poliacrilato (PA), ou Carbowax, podendo também ser um sólido adsorvente, como o carvão ativo microparticulado (Carboxen) (Valente; Augusto, 2020). Esta fibra fica acondicionada em uma microseringa, que a protege quando não está em uso. Posteriormente, os analitos são dessorvidos termicamente, no injetor do cromatógrafo a gás (GC). A SPME preserva todas as vantagens da SPE, tais como simplicidade, baixo custo, fácil automação, e facilidade de amostragem em campo, e, ao mesmo tempo, elimina desvantagens da SPE, como o entupimento do cartucho e o uso de solventes.

A SPME envolve algumas etapas, como: (1) introdução da fibra; (2) exposição da fibra; (3) retração da fibra para dentro do dispositivo; (4) acomodação do dispositivo; e (5) exposição da fibra no injetor de um GC. Após todas essas etapas, por dessorção térmica, os analitos vão para o sistema cromatográfico quando a coluna é aquecida, conforme o programa de temperatura realizada para a separação destes. Observou-se que muitas variáveis influenciam no processo de extração, como o tempo de exposição da fibra na solução a ser analisada, a presença de interferentes, os parâmetros de validação, como seletividade, linearidade, reprodutibilidade, recuperação, entre outros. Os modos de operação em SPME são a extração via: (A) *headspace*: o recobrimento da fibra (fase sólida) não entra em contato direto com a amostra, e os analitos são volatilizados através de uma barreira de ar até atingirem a fibra; (B) extração direta: o recobrimento da fibra é inserido diretamente na amostra quando os analitos possuem características de volatilidade média e baixa; (C) extração indireta: recomendada apenas quando o modo direto ou *headspace* não são adequados, com analitos com características de volatilidade baixa. Utiliza-se uma membrana protetora sobre a fibra para proteção no caso de análise de amostras complexas e sujas, como os fluidos biológicos. Durante o desenvolvimento do método, é importante padronizar o controle de algumas variáveis experimentais, como temperatura e tempo de extração, escolha do revestimento da fibra, velocidade de agitação, pH e força iônica do meio, e tempo de dessorção (Lanças, 2004).

## QuEChERS e QuEChERSER

Em 2003, Anastassiades e colaboradores desenvolveram o método “rápido, fácil, barato, eficiente, robusto e seguro”, em inglês, “*quick, easy, cheap, effective, rugged and safe*”, que forma o acrônimo QuEChERS. O método foi desenvolvido para a determinação de resíduos de agrotóxicos em amostras de alimentos e tornou-se o método oficial da European Committee for Standardization (CEN - EN 15662)<sup>1</sup>.

Basicamente, a extração é subdividida em três etapas: extração, partição e limpeza, e possui três principais versões: original, citrato e acetato (Anastassiades et al., 2003; Payá et al., 2007; Prestes et al., 2009). Nos últimos anos, o QuEChERS sofreu muitas modificações e tornou-se bem estabelecido em diversas aplicações analíticas, tais como: a) resíduos de agrotóxicos (Ferreira et al., 2016); b) resíduos de drogas veterinárias (Zao et al., 2021); e c) resíduos de pesticidas em solo argiloso (Dacal et al., 2021). Desde o seu desenvolvimento, o QuEChERS representou um grande avanço frente aos outros métodos tradicionais, que utilizam grandes quantidades de reagentes e solventes,

---

<sup>1</sup> Disponível em: <https://www.en-standard.eu/csn-en-15662-foods-of-plant-origin-multimethod-for-the-termination-of-pesticide-residues-using-gc-and-lc-based-analysis-following-acetonitrile-extraction-partitioning-and-clean-up-by-dispersive-spe-modular-quechers-method>

além de reduzir o tempo de análise e custos. Esse avanço vem propiciando análises com bons resultados quando realizadas usando a cromatografia líquida e gasosa (LC e GC) acopladas à espectrometria de massas (MS), que são sensíveis e seletivas (Hrynko et al., 2021). Recentemente, Monteiro e colaboradores (2014) desenvolveram um novo método baseado em QuEChERS, intitulado QuEChERSER Mega Método, cuja principal proposta foi simplificar a extração reduzindo algumas das etapas para amostras como carnes (Monteiro et al., 2021) e peixes (Ninga et al., 2021). QuEChERS foi reavaliado e otimizado em um protocolo de extração genérico, denominado QuEChERSER. Considerado “mega método”, o processo une diversos tipos de análises e é capaz de identificar, ao mesmo tempo, um grande número de compostos, de pesticidas a drogas veterinárias e contaminantes ambientais. A principal inovação é a automatização de parte destas etapas através do uso de robôs, além do aperfeiçoamento de todo processo. O método utiliza dois tipos de análises cromatográficas ao mesmo tempo, líquida e gasosa, os quais quantificam mais de 250 princípios ativos, por isso é chamado de “mega método”. QuEChERSER se mostrou eficaz para a análise de 85% dos 259 contaminantes testados, uma porcentagem significativa para metodologias do tipo multirresíduos. A tecnologia do QuEChERSER ainda não está disponível no Brasil (Almeida, 2021).

O QuEChERSER já tem se expandido para amostras como cânhamo (*Cannabis sativa*) e seus derivados (Michlig et al., 2021). Presume-se que o desenvolvimento de muitos outros trabalhos seja encorajado com o método QuEChERSER, pois são práticos e rápidos, com respostas satisfatórias.

## Técnicas miniaturizadas

Os métodos convencionais utilizam grande quantidade de reagentes, solventes e amostras, e demandam muito tempo de análise. Atualmente têm sido desenvolvidas técnicas miniaturizadas de extração, com consumo mínimo de reagentes e baixa geração de resíduos. Alguns exemplos de técnicas miniaturizadas comumente utilizadas são: a) microextração líquido-líquido dispersiva (*Dispersive liquid-liquid microextraction*, DLLME), b) extração sortiva em barra de agitação (*stir bar sorptive extraction*, SBSE), c) microextração em sorvente empacotado (*microextraction by packed sorbent*, MEPS), d) microextração em fase líquida (*liquid-phase microextraction*, LPME), e) microextração em gota suspensa (*single drop microextraction*, SDME), entre outras.

### **Microextração líquido-líquido dispersiva (*Dispersive liquid-liquid microextraction* - DLLME)**

A técnica foi proposta em 2006 (Rezaee et al., 2006) e consiste em uma extração baseada em um sistema ternário de solventes: dispersor, extrator (fase orgânica) e fase aquosa. Essa técnica apresenta como principais vantagens a miniaturização, baixo

custo, rapidez, alta eficiência de extração e pré-concentração, bem como potencial para aplicação direta em campo.

A extração ocorre pelo processo de partição dos analitos entre duas fases líquidas imiscíveis: o solvente extrator e a fase aquosa, sendo governada pela polaridade. O terceiro solvente é o dispersor, solúvel tanto na amostra aquosa quanto na fase orgânica, para favorecer a formação da dispersão. A extração consiste na injeção rápida de um jato do solvente extrator em uma mistura de solvente dispersor e da amostra aquosa contendo os analitos, formando uma dispersão de microgotas do solvente orgânico na fase aquosa. A extração dos analitos da fase aquosa para a fase orgânica é rápida devido à grande área superficial entre o solvente extrator e a amostra aquosa, favorecendo o processo de partição e a extração. Após a extração, a dispersão é centrifugada e a fase orgânica é transferida para a injeção no sistema cromatográfico para a quantificação dos analitos (Martins et al., 2012).

#### **Extração sortiva em barra de agitação (*stir bar sorptive extraction* – SBSE)**

É uma técnica que integra extração e concentração do soluto em etapa única e em um dispositivo extrator reutilizável, o qual pode ser introduzido no cromatógrafo a gás, reduzindo a perda do soluto e o tempo da análise. A barra de agitação magnética é um pequeno tubo magnético encapsulado por vidro (10 mm a 20 mm de comprimento), revestida com 25–125  $\mu\text{L}$  (0,3–1,0 mm espessura) de polidimetilsiloxano (PDMS). Esta fase polimérica caracteriza-se por apresentar propriedades apolares que promovem interações hidrofóbicas com os analitos alvo, no qual o mecanismo de retenção ocorre principalmente através de forças de “Van-der-Waals”, embora ligações de hidrogênio também possam ter lugar (Nogueira, 2012).

A SBSE, quando comparada aos métodos convencionais de extração, apresenta uma série de vantagens, tais como: não utiliza solvente orgânico; integra a extração e concentração do soluto em etapa única e em um dispositivo extrator reutilizável, e permite a introdução deste dispositivo no sistema analítico.

#### **Microextração em sorvente empacotado (*microextraction by packed sorbent* - MEPS)**

A técnica foi desenvolvida em 2004, e consiste na miniaturização dos volumes dos dispositivos sortivos da extração em fase sólida, na qual os volumes das amostras e dos solventes foram reduzidos de mililitros para microlitros. Na MEPS, uma microcoluna, contendo de 1 mg a 2 mg de sorvente de 50  $\mu\text{m}$  e porosidade 60  $\text{\AA}$ , é conectada à agulha de uma microseringa de 100  $\mu\text{L}$  a 250  $\mu\text{L}$ . A MEPS possui a vantagem de reutilizar de 50 a 100 vezes as microcolunas, não sendo necessário descartá-las, como na SPE. Porém, a desvantagem é que a extração é realizada manualmente, sendo de difícil automação. As etapas da extração por MEPS consistem em: 1) Adicionar o solvente para ativar a fase extratora para o condicionamento; 2) Adicionar o analito na

fase extratora da microcoluna por ciclos aspirar/dispensar a amostra (20–250  $\mu\text{L}$ ); 3) Lavar a fase sólida (*clean-up*) para a remoção de interferentes; e 4) Eluir o analito com alíquotas (20–50  $\mu\text{L}$ ) de solvente orgânico ou de fase móvel e injetar no sistema analítico (Queiroz, 2011).

#### **Microextração em fase líquida (*liquid-phase microextraction* - LPME)**

Trata-se de uma minituarização da extração líquido-líquido, que combina o conceito de extrações com membranas ao uso reduzido de razões solvente orgânico/fase aquosa, conservando os princípios observados na LLE convencional (Santos et al., 2018). A LPME não necessita de nenhum aparato específico para sua implantação, podendo ser empregada em duas configurações principais: configuração em “U”, que utiliza duas microseringas conectadas à fibra (mais empregada), e configuração tipo “haste” (“*rod-like*”), em que uma microseringa é utilizada para injetar e coletar a fase aceptor (Magalhães et al., 2009). A LPME pode ser utilizada de dois modos: em duas ou três fases, de acordo com as características do analito em estudo (Oliveira et al., 2008).

#### **Microextração em gota suspensa (*single drop microextraction* – SDME)**

Foi introduzida em 1996, por Jeannot e Cantwell (1996), e consiste em utilizar uma microgota de solvente orgânico imiscível em água (~50  $\mu\text{L}$ ) imersa na solução da amostra através de um dispositivo de politetrafluoretileno (PTFE). Após a extração sob agitação, o dispositivo era retirado da amostra, e a fase orgânica injetada no cromatógrafo a gás. Os analitos de alto coeficiente de partição podem atingir altas concentrações, já que são transferidos por difusão de um volume alto de amostra (1–5 mL) para um microextrato (5–50  $\mu\text{L}$ ). Como desvantagem, a SDME não é tão robusta, pois pode ocorrer perda de solvente durante a extração, durante a etapa de agitação, e amostras viscosas ou particuladas precisam passar por pré-tratamento (Pedersen-Bjergaard et al., 2005).

#### **Extração em ponteira**

A técnica de extração em ponteira descartável (DPX) veio de uma patente (nº US6566145 B2), desenvolvida pelo Dr. William Brewer, da Universidade da Carolina do Sul, Estados Unidos, em 2003 (Pinto, 2015), e surgiu como alternativa de extração em fase sólida. A técnica DPX é uma técnica baseada no equilíbrio de sorção do analito com o sorvente, e utiliza uma ponteira (1 mL ou 5 mL) em que uma pequena quantidade de sorvente está contido livremente entre dois filtros, posicionados nas extremidades superior e inferior. O filtro inferior é permeável, para permitir a passagem de fluido na aspiração e dispensação, e o filtro superior é impermeável, para

impedir a passagem da amostra para o interior da pipeta. As etapas da extração por DPX consistem em: 1) Condicionar a fase extratora com um solvente apropriado para ativação dos sítios de ligações; 2) Aspirar a amostra para o interior da ponteira e misturá-la à fase extratora por meio da aspiração de ar, o qual promove a retenção do analito no sorvente, formando uma suspensão e permitindo uma extração rápida e eficiente; 3) Dispensar a amostra e aspirar um solvente para a remoção dos interferentes; 4) Aspirar o solvente de eluição, seguido da aspiração de ar, várias vezes, para uma completa dessorção dos analitos. O eluato pode ser injetado no sistema cromatográfico ou evaporado e reconstituído. As vantagens da DPX são a rapidez, simplicidade, volume reduzido de amostra, de solvente orgânico e uma menor massa de sorvente, sem necessidade de utilizar o vácuo, como na SPE (Pinto, 2015).

## MÉTODOS INSTRUMENTAIS

### Cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas em série (LC-MS/MS)

A cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas é, atualmente, a técnica que possibilita a análises de diversas substâncias com ampla caracterização de polaridade e massa molecular. Na cromatografia é feita a separação dos componentes de uma mistura entre duas fases: uma fixa e de grande área superficial, denominada fase estacionária, e um fluido que interage com a fase fixa, chamado fase móvel. As partes principais de um cromatógrafo são a bomba, o injetor, a coluna e o detector. O acoplamento da cromatografia líquida LC à espectrometria de massas MS foi um processo muito complexo, porque a LC é utilizada para compostos não voláteis, sendo a fase móvel um líquido e, neste estado da matéria, era impossível introduzir os compostos em um analisador MS, que funciona à base de íons na fase gasosa.

LC-MS/MS combina o poder de separação do sistema HPLC, e, no ponto de fases líquidas móveis que saem da coluna, a amostra líquida é pulverizada para produzir microgotas. Estas evaporam rapidamente, liberando as moléculas de analito ionizadas, que podem, então, ser separadas via MS. Sprays de fluxo de grandes dimensões podem se beneficiar de atomização adicional ou nebulização usando alto fluxo de um gás inerte como o nitrogênio. As principais aplicações são na pesquisa farmacêutica, análise ambiental, análise de alimentos e medicina forense (Bustillos, 2020).

A espectrometria de massas vem sendo largamente utilizada nas áreas biológica e alimentícia devido a algumas características da técnica, tais como alta detectabilidade, que permite que concentrações baixas de substâncias sejam detectadas e analisadas, baixo volume de amostras e uso de interfaces apropriadas para pequenos volumes, possibilitando a utilização de quantidade muito pequena de amostras, pos-

sibilidade de associação com técnicas de separação, e a utilização de misturas água/solvente na ionização, que faz com que a técnica seja ideal para o acoplamento de sistemas de separação como HPLC.

A espectrometria de massas é uma técnica para análise à nível de traços, especialmente dos compostos orgânicos. Entretanto, os analitos devem ser previamente ionizados. Portanto, este analisador possui, basicamente, uma fonte de ionização, um analisador, detector e sistema de dados.

Na fonte de íons, os componentes de uma amostra são convertidos em íons. Pela ação de um agente ionizante, os íons positivos ou negativos são imediatamente acelerados em direção ao analisador de massa, cuja função é separar tais íons de acordo com a sua relação massa-carga ( $m/z$ ).

No sistema LC-MS/MS, é necessário utilizar uma interface, pois as vazões utilizadas em HPLC são altas (cerca de  $1,0 \text{ mL min}^{-1}$ ), e não podem ser bombeadas diretamente ao interior do espectrômetro, que opera a baixas pressões ( $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$ ). Essa interface é uma fonte de ionização, que deve remover grande parte da fase móvel e realizar a ionização do analito.

## Fontes de Ionização

### a. Ionização por eletronebulização (ESI)

Na ESI, é emitido um feixe de elétrons de alta energia a partir de um filamento aquecido, que atinge o fluxo das moléculas. Estas moléculas interagem com os elétrons emitidos por um filamento de W ou Re, aquecidos e acelerados por meio de um potencial de 70 V entre o filamento e o anodo. A colisão causa uma fragmentação significativa de íons moleculares. O padrão de fragmentação de um composto é reproduzível, e estão disponíveis muitas bibliotecas de dados. Isso permite que se compare o espectro de massa de um composto da amostra com milhares de dados em uma biblioteca espectral em questão de segundos, o que simplifica o processo de determinação ou confirmação de um composto. Uma desvantagem é que a amostra deve ser relativamente volátil, e isso dificulta a análise de compostos de peso molecular alto e da maioria das biomoléculas (Chiaradia et al., 2008).

### b. Ionização Química (CI)

Na CI-MS, as moléculas da amostra são combinadas com um fluxo de gás reagente ionizado, presente em grande excesso quando comparado com a amostra. Quando ocorre a colisão, algumas moléculas são ionizadas por vários mecanismos, como transferências de prótons, transferências de elétrons e formação de adutos. Os gases mais utilizados são metano, amônia, isobutano e metanol. A escolha do gás deve ser feita com cuidado, para adequar melhor a afinidade protônica do gás

à da amostra, a fim de garantir uma ionização eficiente sem fragmentação excessiva. A principal vantagem é a produção seletiva de íons quase moleculares  $[M+H]^+$  intactos. Como a amostra deve ser rapidamente vaporizada, impede a análise de compostos de peso molecular alto e de muitas biomoléculas (Bustillos, 2020).

### c. Ionização por eletrospray (ESI)

A ionização por electro spray é uma técnica usada em espectrometria de massa para produzir íons usando um electro spray, no qual uma alta voltagem é aplicada a um líquido para criar um aerossol. Embora seja normalmente considerado uma fonte de ionização, o electro spray é, na realidade, um processo de transferência de íons pré-existentes em solução para a fase gasosa. De qualquer forma, é fácil entender porquê uma técnica que permite a transferência de íons de uma solução para a fase gasosa para análise por espectrometria de massas teve, em tão pouco tempo, um impulso tão grande: isto se deve ao fato de a maioria dos processos químicos e bioquímicos ocorrerem em fase líquida, envolvendo, muitas vezes, espécies pouco voláteis (Chiaradia et al., 2008).

A principal vantagem do electro spray sobre estas outras técnicas é que a dessolvatação ocorre gradualmente em temperaturas relativamente baixas (tipicamente, em temperatura ambiente até 80 °C), de forma a não gerar fragmentos e moléculas ionizadas. Assim, muitos dos íons gerados na fase gasosa mantêm exatamente a mesma estrutura e carga das espécies em solução, o que é perfeito para análise de espécies não voláteis e para estudos de especificação (Crotti et al., 2006).

A técnica de electro spray permite a análise de compostos com peso molecular de até 200.000 Da em equipamentos com pequeno alcance de massas (30 u a 3000 u). Isto porque, no electro spray, moléculas com alto peso molecular podem ter múltiplas cargas, que podem ser adquiridas pela ionização da macromolécula em diversos pontos da cadeia, ou, mais comumente, pela incorporação de espécies iônicas pequenas que estejam presentes na solução. Este é o caso, por exemplo, da incorporação de  $NH_4^+$  ou  $Na^+$  no modo íons positivos, ou de  $HCOO^-$  ou  $OH^-$  no modo íons negativos. Obviamente, com a incorporação destas espécies, além do aumento de carga, há também o aumento de massa. Espectrometria de massas com ionização por electro spray é aplicada ao estudo de espécies inorgânicas e organometálicas (Moraes; Lago, 2003).

### d. Ionização Química à Pressão Atmosférica (APCI)

Na APCI, o eluente da coluna cromatográfica passa por um nebulizador pneumático, no qual gotas são geradas e dessolvatadas. O spray formado passa por uma região aquecida na qual o vapor é seco, formando espécies neutras que passam através de uma corona de descarga. Um campo suficiente para gerar ionização é aplicado na corona. Como o solvente encontra-se em maior concentração no

spray do que o analito, este é ionizado, preferencialmente, e passam a ocorrer reações entre estes íons em fase gasosa e as moléculas neutras do analito, o que dá origem aos íons do analito (Chiaradia et al., 2008). APCI-MS é muito utilizado nas análises químicas de macromoléculas, além de ser a primeira seção do espectrômetro de massas a ser liberada da dependência de um sistema de vácuo.

Após a ionização, os íons são analisados pelo analisador de massas de acordo com sua razão massa/carga (ESI-MS). Vários tipos de amostras podem ser analisadas: Substâncias de polaridade e massa molecular mediana, tais como Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (PAH), Bifenilas Policlorados (PCBs), ácidos graxos, esteroides e ftalatos, substâncias sem sítios ácidos ou básicos, ureias e carbamatos. As substâncias a serem evitadas são as instáveis a temperaturas mais altas e massa molecular elevada.

### **Analisadores**

Alguns espectrômetros de massas combinam vários tipos de analisadores. Os mais comuns incluem dois ou mais dos seguintes: Quadrupolos, TOF (time of flight), e Íon trap. Em geral, o primeiro analisador separa os íons, e uma célula de colisão é usada para os íons do fragmento, separados do fragmento por um segundo analisador.

#### **a. Analisador Quadrupolo**

Um analisador de quadrupolo consiste em quatro barras paralelas, arrançadas em dois pares opostos, com potencial elétrico aplicado. Com a aplicação de voltagens, a trajetória centralizada dos íons é afetada, e somente íons com uma razão  $m/z$  determinada irão atravessar no centro do quadrupolo, enquanto os outros serão desviados da trajetória central. O espectro de massas é obtido a partir da realização da variação das voltagens do quadrupolo, de maneira a se realizar uma varredura em toda a faixa de  $m/z$  desejada.

No sistema LC-MS/MS, o triplo quadrupolo é o mais utilizado nas análises de resíduos e contaminantes. A amostra é introduzida e retida inicialmente na coluna, pela qual a fase móvel é bombeada, fazendo com que o analito migre de acordo com as interações entre as fases móvel e estacionária. Na coluna, estes compostos são separados e eluidos com determinados tempos de retenção (TR). Após a eluição, eles são introduzidos no espectrômetro de massas na fonte de ionização, onde ocorre a ionização e evaporação do solvente. Formados os íons, estes seguem para o primeiro analisador, em que os íons precursores,  $[M+H]^+$  ou  $[M-H]^-$ , são determinados segundo a razão massa/carga ( $m z^{-1}$ ). Após a determinação da  $m z^{-1}$  dos íons precursores, estes são encaminhados para uma célula de colisão, onde se localiza o segundo quadrupolo, que, através da colisão com o gás argônio (mais utilizado), forma fragmentos que são determinados no segundo analisador, o terceiro

quadropolo. Este processo é chamado de *Multiple Reaction Monitoring* (MRM), que permite o monitoramento entre os íons precursores e íons produtos selecionados, aumentando a sensibilidade nas análises (Bustillos, 2020).

Esse analisador de massas apresenta três principais vantagens: ele tolera pressões relativamente altas, os quadropolos têm uma significativa escala de massa, com a capacidade de se analisar uma taxa  $m/z$  de 4000, que é útil porque a ionização por electrospray de proteínas e outras biomoléculas comumente produz distribuições de carga a partir de taxas de  $m/z$  de 1000 e 3500. Finalmente, espectrômetros de massas de quadropolos são instrumentos de relativamente baixo custo.

#### **b. Analisador de tempo de voo - TOF**

O TOF-MS baseia-se na medida do tempo que um íon leva para atravessar a fonte de íons até chegar no detector. Ao entrar no TOF, todos os íons recebem um pulso de energia e são acelerados de maneira diferente, em função de suas  $m/z$ . Assim, os íons chegam ao detector em tempos diferentes. Os íons com menor  $m/z$  possuem maior velocidade e chegarão primeiro ao detector. Pode-se analisar compostos de massa baixa e até macromoléculas. TOF é mais sensível do que o quadropolo, pois tudo que entra no analisador chega ao detector. No quadropolo, apenas 25% dos íons conseguem atingir o detector.

#### **c. Analisadores de captura de íons (íon trap)**

É uma combinação de campos elétricos ou magnéticos que captura íons em uma região de um sistema de vácuo ou tubo de vácuo. Existem dois tipos de espectrômetros de massas de captura de íons: captura de íons por quadropolos tridimensionais (também chamada de captura dinâmica), e de ressonância em ciclotron (captura estática). Ambas funcionam acumulando íons no seu interior, manipulando correntes alternada e de radiofrequência simultaneamente. A captura permite a liberação controlada de íons, o que permite analisar sua separação controlada, com uma resolução muito grande. A possibilidade de capturar íons por períodos que variam de milissegundos a dias permite a análise de reações de fragmentação extremamente incomuns, dando origem a espectros de massas que não podem ser obtidos através de nenhuma outra técnica.

Vantagens desse analisador: alta sensibilidade, na qual os íons são pré-concentrados e sucessivamente analisados; permite a realização de EM em multietapas, baixo custo, simplicidade, robustez e dimensão pequena (~ 5 x 5 x 5 cm). As desvantagens são: ineficiente para se medir abundância relativa dos íons; sujeito à interferência por espécies carregadas e reações intermoleculares; necessidade de otimização simultânea de vários parâmetros para a obtenção de dados de boa qualidade; e baixa resolução (resolução “unitária”).

Na Embrapa Meio Ambiente foram realizados diversos trabalhos relacionados ao desenvolvimento e validação de metodologia para análise de resíduos de pesticidas utilizando a LC-MS/MS em vários tipos de matrizes: peixes (Ferracini et al., 2014; Hashimoto et al., 2012; Shiroma et al., 2019; Nunes et al., 2018), solo (Assalin et al., 2014), cebola (Silva et al., 2017), água (Monteiro et al., 2014), efluentes (Assalin et al., 2016), soro de cordeiro (Batista et al., 2017), frutas e legumes (Queiroz et al., 2012), manga (Ferracini et al., 2011), água de coco e albúmen (Ferreira; Queiroz, 2021), forrageiras (Assalin et al., 2020), feijão (Concenço et al., 2020), papinha de bebê (Petrarca et al., 2017), vinho (Miele et al., 2016) e suco de uva (Miele et al., 2015).

### Cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas em série (GC-MS/MS)

A técnica de cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas em série tem permitido uma maior confiabilidade e seletividade nas análises de resíduos de pesticidas em diferentes matrizes. Para seu uso, o pesticida tem que ser volátil e termicamente estável. Apesar de hoje ser muito utilizada a técnica LC-MS/MS, alguns pesticidas, como os organoclorados e piretróides, são mais sensíveis à GC-MS, e um número significativo de pesticidas é detectado em baixas concentrações em ambas as técnicas (Pico et al., 2020). A espectrometria de massas com uso de triplo quadrupolo (QqQ) garante uma maior sensibilidade, utilizando monitoramento de reações múltiplas (MRM). Geralmente são monitoradas duas transições: uma para quantificação, e outra para confirmação. A combinação do tempo de retenção e transições MRM (2 íons produtos) são excelentes parâmetros para correta identificação e confirmação do pesticida em estudo. A introdução do extrato da amostra ocorre, geralmente, em injetores SPL (*split/splitless*), ou vaporização por temperatura programada (*Programmable Temperature Vaporizing* - PTV), em que são injetados volumes maiores. A separação cromatográfica ocorre em uma coluna que está inserida em um forno com programação de temperatura.

As fontes de ionização por elétrons (*Electron ionization* - EI) e a ionização por pressão atmosférica (*Atmospheric-pressure chemical ionization* - APCI) são utilizadas na maioria das análises de pesticidas, sendo a segunda, para GC, utilizada mais recentemente (Saito-Shida et al., 2020). No entanto, o uso da EI permite a fragmentação uniforme e reprodutível em qualquer equipamento de GC-MS que utilize essa fonte com energia de ionização padrão de 70 eV, permitindo a comparação dos espectros com as bibliotecas existentes, como a NIST (*National Institute of Standards and Technology*). Outras técnicas são combinadas com essa, como microextração em fase sólida (SPME), *headspace* (HS) (Li et al., 2018), microextração líquido-líquido dispersiva (DLLME) (Carro et al., 2012), as quais trazem vantagens dependendo do pesticida e da matriz analisada.

Apesar de serem técnicas em conformidade com o princípio da química verde, com redução do uso de solvente, a metodologia de extração QuEChERS, que também inovou com a redução de uso de grandes volumes de solventes na extração, desenvolvida por Anastassiades et al. (2003), tem sido amplamente utilizada em conjunto com a técnica GC-MS/MS, na qual foi possível, em uma única análise, detectar e quantificar diferentes classes de pesticidas, e, assim, otimizar e validar os métodos multiresíduos. Na GC-MS/MS, ocorre em muitos casos o uso da metodologia QuEChERS, o efeito matriz. Esse efeito ocasiona um aumento de resposta do sinal quando constituintes da matriz criam sítios ativos no sistema cromatográfico, causando um aumento de eficiência de transferência do analito, aumentando, assim, a resposta do sinal na presença da matriz. Isso pode ser resolvido com o uso de curva de calibração na matriz (*matrix-matched*) (Lehotay et al., 2010).

Na literatura são encontrados diversos trabalhos de desenvolvimento e validação de metodologia para análise de resíduos de pesticidas utilizando GC-MS/MS em amostras diversas: frutas (Tankiewicz, 2019), sedimento (Dutra et al., 2019), água (Barizon et al., 2019), solo (Paraíba et al., 2011), cebola (Silva et al., 2017), água de coco e albúmen (Ferreira; Queiroz, 2021), grãos de soja (Queiroz et al., 2017), e por GC-MS/MS (detector tipo Íon Trap) em pólen apícola (Oliveira et al., 2016).

## LIMITES MÁXIMOS DE RESÍDUOS (LMR) ESTABELECIDOS PELAS AGÊNCIAS REGULADORAS

O Limite Máximo de Resíduos (LMR) é a quantidade máxima de resíduo de agrotóxico ou afins oficialmente aceita no alimento, em decorrência da aplicação adequada em uma fase específica, desde sua produção até o consumo. LMR são expressos em miligrama de resíduo por quilograma de alimento ( $\text{mg Kg}^{-1}$ ), estipulados pelos órgãos reguladores nacionais e internacionais. A extrapolação desses limites nos alimentos pode gerar litígios comerciais entre países exportadores e importadores, levando à criação de Barreiras Técnicas Comerciais.

O *Codex Alimentarius* é um Programa Conjunto da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) e da Organização Mundial da Saúde (OMS). Este documento se tornou um ponto de referência mundial para os consumidores, produtores e elaboradores de alimentos, para os organismos internacionais de controle e comércio de alimentos. Sua influência se estende a todos os continentes, e sua contribuição à proteção da saúde dos consumidores e à garantia de práticas equitativas no comércio de alimentos é incalculável. O *Codex Alimentarius* determina Limites Máximos de Resíduos (LMR) de agrotóxicos nos produtos de origem animal ou vegetal destinados ao consumo. No entanto, suas decisões têm apenas um caráter consultivo, e não deliberativo, o que permite a possibilidade de interpretações divergentes dos critérios de análise adotados pelas partes interessadas.

O *Codex Alimentarius* segue recomendações de institutos de pesquisas e grupos de peritos em agrotóxicos da FAO, da OMS e da *Joint Meeting on Pesticides Residues* (JMPR). A legislação internacional determina LMR para diversos ingredientes ativos (IA) em diferentes commodities, servindo de referência para substâncias não contempladas pelas legislações nacionais, e contestações são levadas à Organização Mundial do Comércio.

No caso do Brasil, o estabelecimento de LMR está previsto na legislação de agrotóxicos, mais especificamente no Decreto nº 4.074/2002, sendo esta uma atribuição do Ministério da Agricultura e Ministério da saúde. A determinação de LMR por parte do *Codex* interessa aos países exportadores, mas nem sempre são adotadas, especialmente pelos países importadores que possuem órgãos reguladores consolidados e regras restritivas para o controle de agrotóxicos. Estes consideram que os padrões estabelecidos pelo *Codex* nem sempre são apropriados para todos os países (OMC, 2012). Os limites estabelecidos levam em consideração estudos de resíduos em culturas tratadas e a Ingestão Diária Aceitável (IDA), que é a quantidade máxima de agrotóxico que um determinado indivíduo pode ingerir por dia, durante toda a vida, sem que sofra danos à saúde por tal ingestão.

Dentre as limitações dos LMR estabelecidos pelo *Codex* estão as diferenças edafoclimáticas regionais, que podem refletir nos resultados dos estudos de resíduos, as diferenças das condições na geração e análise dos estudos de resíduos (como práticas agrícolas na condução do experimento, metodologia e equipamentos laboratoriais para análise dos resíduos), assim como os hábitos alimentares de cada país, os quais podem significar maior ingestão diária de determinados alimentos. Para superar essas limitações, a comissão do JMPR adota fatores de correção e fatores de incerteza (ambos discricionários), o que deixa espaço para que países importadores argumentem pela necessidade de maior proteção para os consumidores, enquanto os países exportadores podem alegar a necessidade de atender às práticas agronômicas de produção (Codex, 2005; 2013).

A Comissão do *Codex* é composta por vários comitês com diferentes finalidades. Um deles, o Comitê sobre Resíduos de Pesticidas, é responsável por: estabelecer e publicar uma lista dos LMR para cada cultura agrícola/agrotóxico; elaborar as listas prioritárias de agrotóxicos a serem avaliados/reavaliados pelo JMPR (grupo de peritos da FAO/OMS que presta aconselhamento científico ao Comitê); e determinar métodos de amostragem e análise de resíduos de agrotóxicos (Hermida et al., 2015).

No Brasil, os padrões de qualidade para os corpos superficiais de água são preconizados pela Resolução nº 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA (Brasil, 2005), que dispõe sobre as diretrizes ambientais para o enquadramento de qualidade de rios e córregos (Ferraz; Andreola, 2019). Nesta resolução são estabelecidas concentrações máximas permissíveis de metais e alguns compostos orgânicos para águas doces, salinas e salobras, classificadas segundo seu destino de uso e preservação das comunidades aquáticas (Brasil, 2005).

Com relação às águas destinadas ao consumo humano, quanto à sua ingestão, valores máximos permissíveis devem estar de acordo com a Portaria de Consolidação nº 05/2017, do Ministério da Saúde, e com a resolução da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa), RDC nº 275/2005 (Brasil, 2017; Brasil, 2005; Ferraz; Andreola, 2019).

## PROTOCOLOS PARA VALIDAÇÃO DE MÉTODOS ANALÍTICOS

Para que um método analítico seja confiável e adequado ao uso pretendido, há necessidade de validá-lo por meio de avaliação de diversos parâmetros, conforme descritos abaixo. Os parâmetros, bem como modelos de calibração, são elaborados, otimizados e validados visando uma análise livre de interferências nas amostras, a fim de atingir os LMR estabelecidos pelos órgãos normalizadores nacionais e internacionais (Inmetro, 2007; European Commission, 2002; EURACHEM, 2012; European Commission, 2017, CODEX, 2013).

### Seletividade

É a capacidade do método analítico de distinguir o analito (substância de interesse) dos demais componentes da amostra. Desta forma, certifica-se que a resposta do analito seja capaz de ser determinada independentemente de todos os componentes presentes nas amostras, sem quaisquer interferências (Ribani et al., 2004).

### Efeito matriz

Trata-se de um parâmetro que permite avaliar se a curva analítica deve ser construída a partir da amostra (matriz ou extrato) ou no solvente. O fenômeno de supressão, ou aumento de íons, ocorre quando se emprega a cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas sequencial (LC-MS/MS), ou a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas sequencial (GC-MS/MS), e podem influenciar e conduzir a erros na quantificação dos analitos, bem como a detecção, a exatidão e a precisão do método. Algumas estratégias, como a diluição da amostra, são utilizadas para reduzir o efeito matriz. Quando o efeito matriz indica um aumento ou supressão de sinal significativamente alto, sugere-se que a determinação do analito seja realizada na curva a partir da amostra (Ferrer et al., 2011).

## Linearidade (faixa linear)

A linearidade é determinada a partir de uma faixa de concentração do analito, dada pela variável (x) estabelecida em uma curva analítica, e a capacidade de obtenção de resposta do equipamento, dada pela variável (y), quando produz uma equação de regressão linear, a partir dos coeficientes de inclinação da curva, (a) e (b), de interseção da curva com eixo y, quando  $x=0$ , dada pela equação:  $y=ax+b$ . Além disso, a linearidade pode ser calculada utilizando o coeficiente de correlação (r), bem como através do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), e os ajustes são considerados satisfatórios quando estão iguais ou acima de 0,99 (European Commission, 2017).

## Exatidão

A exatidão corresponde aos resultados de um valor de referência comparados ao de um determinado ensaio, mostrando a existência de erros sistemáticos e o grau de concordância. Existem alguns procedimentos que podem avaliar a exatidão, como: materiais de referência, adição padrão, comparação de métodos, e, um dos mais utilizados, os ensaios de recuperação. Os valores aceitáveis de recuperação podem variar de 50-150%, com precisão de até  $\pm 20\%$  (European Commission, 2017; Lanças, 2004).

## Precisão

A repetitividade ou precisão intra-dia avalia a proximidade dos resultados partindo de uma mesma amostra, bem como a concordância entre sucessivas medições sob as mesmas condições de um mesmo método como repetições, procedimento, instrumento, local, mesmo analista e mesmo dia. Pode ser calculada utilizando a estimativa do desvio-padrão relativo, expressa em RSD, e coeficiente de variação (CV), com valores aceitos de até 20%. Já a precisão intermediária, ou intra-dia, avalia se a mesma amostra corresponde aos mesmos resultados, utilizando o mesmo laboratório, e variando condições como tempo, analistas e equipamentos (Ribani et al., 2004).

## Limite de detecção (LOD) e limite de quantificação (LOQ)

O limite de detecção (LOD) determina a menor concentração do analito que pode ser detectada pelo equipamento, enquanto o limite de quantificação (LOQ) corresponde à menor concentração que pode ser quantificada e obtida experimentalmente utilizando o método, desempenhado com veracidade e precisão. O LOD e LOQ podem ser calculados considerando três métodos: parâmetros da curva analítica, visual ou relação sinal ruído (European Commission, 2017; Ribani et al., 2004).

## Limite de decisão ( $CC\alpha$ ) e capacidade de detecção ( $CC\beta$ )

São parâmetros definidos que medem o desempenho do procedimento analítico considerando a incerteza da medição no nível de concentração no qual se toma alguma decisão, o chamado nível de interesse (CE 657, 2002). O  $CC\alpha$  é o limite a partir do qual se pode concluir que uma amostra não é conforme, com uma probabilidade de erro de  $\alpha$ . O erro  $\alpha$  é a probabilidade de uma amostra analisada ser conforme apesar de se ter obtido um resultado não conforme (falsa decisão não conforme). O  $CC\beta$  é o teor mais baixo de substância que pode ser detectado, identificado e/ou quantificado em uma amostra com uma probabilidade de erro de  $\beta$ . Esses parâmetros são utilizados para reportar os dados sobre resíduos em produtos de origem animal. Em caso de substâncias em que não está definido um limite permitido, a capacidade de detecção é a concentração mais baixa a que o método é capaz de detectar nas amostras realmente contaminadas com uma certeza estatística de  $1 - \beta$ . No caso de substâncias com um limite permitido estabelecido, a capacidade de detecção é a concentração a que o método é capaz de detectar concentrações nele com uma certeza estatística de  $1 - \beta$ .

Para obter o  $CC\alpha$  e o  $CC\beta$ , são realizadas análises de 20 amostras da matriz branco fortificada com o analito no valor do LMR. De acordo com a Comunidade Europeia, para o cálculo do  $CC\beta$  deveriam ser fortificadas 20 amostras da matriz branco no valor de  $CC\alpha$ . Porém, para simplificar o método, o Mapa adotou calcular os dois parâmetros com a fortificação de 20 amostras da matriz branco também no LMR, visto que os valores de LMR e  $CC\alpha$  são muito próximos. Os parâmetros são calculados com as Equações 1 e 2:

$$CC\alpha = LMR + 1,64 \sigma \quad (1)$$

$$CC\beta = CC\alpha + 1,64 \sigma \quad (2)$$

em que:  $\sigma$  = Desvio-padrão das 20 medidas.

Esses dois parâmetros foram introduzidos pela Comunidade Europeia, sendo que o  $CC\beta$  é mais utilizado para triagem, quando se quer processar muitas amostras em pouco tempo para detectar a presença do composto e eger amostras não conformes. Nos métodos de confirmação, são exigidos tanto o  $CC\alpha$  quanto o  $CC\beta$ . O  $CC\alpha$  é mais importante, pois determina a concentração a partir da qual se considera uma amostra como não conforme, com uma probabilidade de erro de  $\alpha$ . O erro  $\alpha$  é a probabilidade de uma amostra analisada ser conforme apesar de se ter obtido um resultado não conforme (falsa decisão não conforme). Os erros  $\alpha$  e  $\beta$  estão apresentados na Tabela 15.1.

**Tabela 15.1.** Teste de hipótese para resíduos e contaminantes e a presença de falsos positivo e negativo.

Teste de Hipótese		Resíduos e Contaminantes	
		Ausente	Presente
Resultado do Teste	Negativo	Verdadeiro negativo	Falso negativo (Erro $\beta$ )
	Positivo	Falso positivo (Erro $\alpha$ )	Verdadeiro positivo

## APLICAÇÕES DE MÉTODOS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÃO DE RESÍDUOS E CONTAMINANTES

### Comportamento dos xenobióticos no ambiente

Xenobióticos são produtos estranhos ao ambiente. Contêm anéis aromáticos e alicíclicos, ou seja, produtos derivados de benzeno ou do petróleo, incluindo os pesticidas e, destes, os cloroaromáticos, como cloroanilinas, cloroacetamidas e triazinas representam classes de pesticidas mais utilizadas mundialmente, estando em um extremo de persistência no ambiente. Dentre as cloroanilinas, citam-se os seguintes pesticidas: linuron, diuron, propanil, alachlor, procimidone, que têm como metabólitos comuns 3,4 ou 3,5-dicloroanilina (Melo, 2021).

Pesticidas são substâncias biologicamente ativas projetadas para interferir nos processos metabólicos e controlar pragas, doenças e plantas daninhas. Como geralmente possuem algum grau de toxicidade, é importante compreender o destino ambiental destes compostos, e avaliar sua exposição potencial e riscos associados para a saúde humana e o meio ambiente. A aplicação de pesticidas em áreas agrícolas pode levar ao transporte de uma fração destas substâncias para outros compartimentos ambientais. A compreensão dos processos químicos, físicos e biológicos que controlam os comportamentos dos pesticidas no ambiente é fundamental para identificar e desenvolver estratégias capazes de reduzir possíveis impactos adversos a ele e à saúde humana (Rice et al., 2007).

O destino e o comportamento de um pesticida no solo e água são governados por uma variedade de fatores físicos, químicos e biológicos, muitas vezes complexos e dinâmicos. Estes incluem sorção-dessorção, volatilização, degradação química e biológica, absorção pela planta, escoamento superficial e lixiviação. O transporte de pesticidas do solo para a água, ar ou alimentos é controlado diretamente por esses processos. A sorção/dessorção e degradação (biótica e abiótica) são considerados os mais relevantes, já que a maior parte dos pesticidas aplicados é retida por constituintes do solo, orgânicos e inorgânicos, e/ou degradada por processos químicos ou microbiológicos (Arias-Estévez et al., 2008; Wauchope et al., 2002).

A sorção é um processo importante que regula a acessibilidade de pesticidas a organismos-alvo e seu potencial para atingir organismos não-alvo, por exemplo, por

meio da contaminação da água. Por sorção, nos referimos ao processo físico-químico pelo qual um pesticida presente na solução do solo se liga às partículas deste. A matéria orgânica e os minerais de argila são os principais constituintes do solo envolvidos na sorção dos pesticidas. No entanto, diferentes mecanismos de sorção, incluindo troca iônica, ponte catiônica, transferência de carga, ligação de hidrogênio e interações de Van der Waals, podem ocorrer em solos, dependendo das propriedades de superfície dos sorventes e das características de carga dos pesticidas (Weber, 2018).

A transformação e degradação dos pesticidas é fundamental para atenuar os seus níveis de resíduos no solo. Este processo é influenciado por fatores abióticos e bióticos, e pode seguir caminhos complexos, envolvendo uma variedade de interações entre microrganismos, constituintes do solo e a molécula. Assim, as taxas de degradação dependem de muitas propriedades microbiológicas, físicas e químicas do solo, bem como das propriedades do pesticida (Arias-Estévez et al., 2008; Fenner et al., 2013).

Estudos cinéticos revelaram várias interações entre sorção e degradação. É comumente aceito que os produtos químicos sorvidos são menos acessíveis aos microrganismos, e que a sorção conseqüentemente limita sua degradação, bem como seu transporte. No entanto, embora mais lenta do que em solução, a degradação dos produtos químicos sorvidos não é necessariamente desprezível, e um aumento na sorção não necessariamente acarreta uma redução proporcional na degradação (Lewis et al., 2016).

Os pesticidas aplicados no solo podem mover-se para as águas superficiais por meio do escoamento e da erosão do solo, para as águas subterrâneas por lixiviação, e para a atmosfera por volatilização e deriva. O transporte de pesticidas pelo escoamento superficial e seu impacto na qualidade da água é uma das principais preocupações relacionadas ao uso destas substâncias (Yang et al., 2016).

A Embrapa Meio Ambiente tem participado de pesquisas com o objetivo de compreender os fatores que impactam o transporte de pesticida das áreas agrícolas para outros compartimentos ambientais, com especial atenção para os processos mais relevantes em ambientes tropicais. A manutenção da palhada na superfície do solo, pelo plantio direto de grãos ou colheita mecânica da cana de açúcar, além de trazer inúmeros benefícios para a conservação do solo e da água, também tem grande influência no escoamento superficial dos agrotóxicos. Trovato et al. (2020) demonstraram que a influência da palhada sobre o transporte em superfície de pesticidas depende das características físico-químicas das moléculas. A fração de pesticidas transportada via escoamento superficial foi maior na presença de palhada para moléculas com alta solubilidade em água. Já para moléculas com menor solubilidade, a palhada auxiliou na redução das perdas pelo transporte na superfície do solo.

Pesquisa semelhante foi conduzida por Vaz et al. (2021), que concluiu que os resíduos vegetais mantidos na superfície do solo com o advento da colheita mecanizada na cultura de cana-de-açúcar não foram capazes de reduzir as perdas por escoamento

superficial de moléculas com alta solubilidade em água. Por outro lado, a partir da manutenção de 50% da quantidade de palhada na superfície do solo ( $7 \text{ t ha}^{-1}$ ), foi possível reduzir substancialmente as perdas das moléculas com menor solubilidade em água. Tal resultado é de grande relevância para o setor sucroenergético, pois indica a quantidade de palhada que pode ser removida do campo para geração de energia sem comprometer os benefícios ambientais oriundos de sua manutenção na superfície do solo.

## Programas de monitoramento da qualidade de água

Os agrotóxicos são substâncias utilizadas no controle de pragas na agricultura, e por esta razão são considerados de grande importância para a obtenção dos elevados níveis de produtividade observados nesta atividade nas últimas décadas. No entanto, o uso dos agrotóxicos tem levado a uma série de questionamentos relacionados à saúde humana e ao meio ambiente (Gerónimo et al., 2014; Dellamatrice; Monteiro, 2014; Hunt et al., 2016; Laabs et al., 2007; Ogbeide et al., 2015).

A contaminação dos recursos hídricos por agrotóxicos tem sido registrada em diferentes países e regiões no mundo (Iturburu et al., 2019; Papadakis et al. 2015; Zhou et al., 2020). O transporte dos agrotóxicos das áreas de agricultura até os corpos d' água se dá principalmente pelo escoamento superficial (Vaz et al., 2021), fluxo subsuperficial no perfil do solo, deriva e fontes pontuais de contaminação (Tang et al., 2012).

Diante deste cenário, é fundamental que se monitorem os níveis destes compostos químicos nas águas, possibilitando o estabelecimento de tendências espaço-temporais que, por sua vez, possam subsidiar ações e políticas públicas que visam mitigar eventuais situações de risco à população e ao meio ambiente.

No Brasil, os agrotóxicos têm sido detectados principalmente em águas superficiais. No entanto, os estudos disponíveis são escassos e concentrados em poucas regiões de relevância agrícola. Na maioria destes estudos, os herbicidas são a classe de agrotóxicos com maior frequência de detecção, seguidos dos fungicidas e inseticidas, cujas proporções são aproximadas. Em relação aos riscos, os inseticidas são as substâncias que trazem maior preocupação à biota aquática (Albuquerque et al., 2016; Machado et al., 2016).

Com o objetivo de monitorar a qualidade dos mananciais utilizados para o abastecimento da população, o Ministério da Saúde coordena o Programa Nacional de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (Vigiagua). Os dados de qualidade de água, incluindo a quantidade de agrotóxicos, são inseridos no Sistema de Informação de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (Sisagua) por estados e municípios, ou ainda pelas empresas prestadoras de serviço de abastecimento de água. Até 2021, o Vigiagua monitorava um total de 27 ingredientes ativos. Com a publicação da portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, o programa

passou a monitorar um total de 54 substâncias, entre as moléculas de agrotóxicos e alguns de seus metabólitos (Brasil, 2021).

A participação dos municípios no Vigiagua ainda é pequena, mesmo com o aumento gradual observado ao longo dos anos, e está relacionada ao nível de desenvolvimento econômico da região. O número de municípios participantes do Vigiagua é maior nas regiões sul e sudeste, e muito baixa na região norte. Além disso, a padronização insuficiente da expressão dos resultados analíticos torna difícil a interpretação do conjunto de dados disponíveis no sistema, inconsistência que pode ser atribuída a falhas no preenchimento do Sisagua, uma vez que cada usuário é responsável por esta atividade (Barbosa et al., 2015).

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb) é responsável por uma rede de monitoramento da qualidade da água, incluindo os agrotóxicos. Em parceria com a Embrapa Meio Ambiente, a Cetesb coordenou um projeto de pesquisa com o objetivo de aprimorar o seu programa de monitoramento de agrotóxicos. Além das moléculas legisladas, foram incluídos também compostos não legislados, mas relevantes em termos toxicológicos ou de quantidade utilizada. Os resultados indicaram que o consumo de água oriunda dos mananciais monitorados no estado de São Paulo não acarreta riscos para a população. Por outro lado, concentrações acima de critérios nacionais e internacionais para proteção da vida aquática foram observadas para os agrotóxicos 2,4-D, clorpirofós, fipronil, imidacloprido e malation. (Cetesb, 2021).

Em um trabalho realizado por Monteiro et al. (2014), alguns resíduos de herbicidas, como ametrina, atrazina, simazina e tebutiuron, foram determinados em níveis entre 0,01–10,3  $\mu\text{g L}^{-1}$ . Em 2010, análises físico-químicas e ecotoxicológicas também foram utilizadas para avaliar a qualidade de amostras da água do rio Corumbataí, (água bruta - RW; filtrada - FW; e tratada - TW), processadas pela Estação de Tratamento de Água (ETA) de Piracicaba, SP. Da mesma forma, trihalometanos, tais como clorofórmio e bromodiclorometano, produzidos como resultado do processo da ETA, foram também encontrados em concentrações que não prejudicam a saúde ambiental ou humana. Concentrações de cloro livre elevadas foram encontradas nas amostras de água FW e TW, e foram os prováveis responsáveis pelos efeitos de toxicidade observados na alga *Pseudokirchneriella subcapitata* e no microcrutáceo *Daphnia magna*.

Por outro lado, resultados dos testes de toxicidade realizados com *Hydra attenuata* mostraram que este organismo é resistente a água clorada, sendo um organismo potencial a ser utilizado para avaliações ecotoxicológicas em águas tratadas. O trabalho mostrou que estes testes de toxicidade simultâneos com análises químicas são úteis para descobrir relações de causa-efeito existentes entre supostos resultados tóxicos, físicos e químicos, e, desse modo há uma melhora na interpretação de dados de qualidade da água.

## Estudos ecotoxicológicos (bioconcentração)

A bioconcentração é um fenômeno que ocorre quando a velocidade de absorção de um composto é maior do que a velocidade de eliminação do mesmo, resultando em seu acúmulo no organismo do animal, sendo a forma mais direta de avaliar o acúmulo de substâncias em organismos aquáticos. É um fenômeno importante para prevenir a contaminação de peixes utilizados como alimentos para o consumo humano, para proteger o ambiente aquático e observar a manifestação de efeitos subletais do composto em organismos não alvo (Jonsson, 1991).

A bioconcentração é estimada pelo fator de bioconcentração (FBC), que é calculado de acordo com a Equação 3, sendo uma relação entre a concentração da substância no tecido do peixe ( $C_f$ ) e a concentração na água ( $C_w$ ), quando se atinge o equilíbrio aparente durante a fase de acúmulo do composto (Jonsson, 1991):

$$FBC = C_f/C_w \quad (3)$$

Quando uma determinada concentração de um agente tóxico (antibióticos, agrotóxicos, metais pesados) é adicionada à água em que os peixes são criados, podem ser realizados ensaios de bioconcentração. Voogt et al. (1990) estudaram o acúmulo de agrotóxicos como dibenzodioxinas policloradas em peixes e outras espécies aquáticas, como crustáceos.

Esses estudos de bioconcentração também já foram realizados para avaliar inseticidas como cipermetrina clorpirifós (Bonansea et al., 2017), endosulfan (Jonsson, 1991), fármacos como ibuprofeno em peixe boi de cabeça chata e bagre americano (Nallani et al., 2011), de sulfonamidas, fluoroquinolonas, macrolídeos e cloranfenicol em água, sedimento, produtos marinhos e utilizados na alimentação, como camarão, ostras e caranguejo (Zhang et al., 2018), e metais pesados como mercúrio (Cember et al., 1978). Na Embrapa Meio Ambiente foi verificada também a bioconcentração dos herbicidas ametrina, diuron, hexazinone e tebutiuron utilizados em cana de açúcar em tilápia (Jonsson et al., 2019), cana de açúcar (Cerdeira et al., 2015), milho (Paraíba, et al., 2010), e sulfametazina em tilápia (Nunes et al., 2018).

Avaliar a bioconcentração é relevante para confrontar os dados de acúmulo de um composto em determinado organismo com os valores de IDA propostos pela OMS. Por meio deste ensaio, pode-se também estudar a redução do composto dos tecidos do organismo quando cessa a exposição e calcular o tempo de depleção de resíduos dos peixes (Jonsson, 1991). Com essas informações, podem-se estabelecer recomendações técnicas aos produtores, a fim de obter um produto seguro para consumo e potencialmente comercial.

## Segurança dos alimentos

Os alimentos desempenham funções importantes no fornecimento de energia e nutrientes, contribuindo para o desenvolvimento e saúde do ser humano e do animal. Contudo, a ação antropogênica no tratamento contra doenças, pestes e o aumento para a produção de alimentos têm como consequência a introdução de medicamentos veterinários e agrotóxicos em matrizes alimentares de origens animal e vegetal. Algumas dessas substâncias ainda foram pouco estudadas e o conhecimento sobre elas é escasso. São recentes as descobertas dos riscos da presença dessas substâncias nos alimentos, por isso são caracterizadas como contaminantes (Almeida, 2011; Pres-tes et al., 2009).

A garantia de segurança e qualidade do alimento é uma preocupação dos consumidores, que têm se atentado à possibilidade de contaminação em vários setores do processo produtivo, e isso tem se tornado um dos grandes desafios no controle quando associados às misturas de contaminantes. Adicionalmente, o número desses contaminantes introduzidos nos alimentos tem preocupado em decorrência da capacidade de sofrerem bioacumulação, podendo se transformar em substâncias mais nocivas, e o número desses compostos inseridos na alimentação, de forma acidental ou intencional, vem aumentando exponencialmente (Sousa et al., 2010; Ajikumar et al., 2010).

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) realiza, desde 2001, o Programa de Análise de Resíduos de Agrotóxicos em Alimentos (Para), uma ação do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS), coordenado pela Anvisa, em conjunto com órgãos estaduais e municipais de vigilância sanitária e laboratórios estaduais de saúde pública. A análise consiste em identificar os tipos de agrotóxicos presentes nos alimentos, verificar se são autorizados para aquela cultura, e se estão dentro do limite máximo de resíduos (LMR) permitido pela Anvisa (Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2016).

Ao longo dos 15 anos do Para, detectou-se ingredientes ativos não autorizados para a cultura ou não autorizados no país, sendo que a partir do ano de 2007 ocorreu um aumento deste percentual, chegando, em 2008, próximo de 90% dos ingredientes ativos detectados (Lopes et al., 2021). O resultado apresentado pelo Para serve para subsidiar as ações de fiscalização da vigilância sanitária e dar suporte a uma estimativa de exposição alimentar aos agrotóxicos, o que é imprescindível na reavaliação dos ingredientes ativos já registrados, além de fornecer informações ao Ministério da Agricultura para orientar as ações de fiscalização no campo. Outro avanço proporcionado pelos resultados do Para foi a criação de legislações específicas para o controle e a fiscalização da rastreabilidade de hortifrutis em toda a cadeia produtiva desses alimentos, possibilitando aos fiscais mapear e penalizar os responsáveis por casos de amostras irregulares.

O fato de o perfil de irregularidades prevalentes nos alimentos ser de ingredientes ativos não autorizados para a cultura, ou não autorizados no país, traz uma preocupação ainda maior quanto ao risco existente, já que estas substâncias não estão incluídas nos cálculos da ingestão diária aceitável (IDA). O próprio procedimento utilizado para o cálculo da IDA também é bastante questionável, em decorrência da fragilidade das evidências científicas que o sustenta. Além disso a IDA desconsidera os efeitos sinérgicos de outras drogas ou outros fatores intervenientes do próprio agrotóxico ou da sua ação sinérgica a outros produtos químicos (Carneiro et al., 2015)

Novos estudos são necessários para a compreensão da permanência ou do aumento da presença de agrotóxicos, autorizados ou não, nos alimentos comercializados no país, diante da farta evidência dos prejuízos que acarretam à saúde. Destaca-se a existência do monitoramento e a identificação da presença de resíduos de agrotóxicos proibidos no país ou para a cultura, ou acima dos limites permitidos, possibilitando um alerta ainda maior para a sociedade.

### Outras aplicações - *Wetlands*

Contaminantes emergentes que abrangem diversos produtos químicos, como corantes, fármacos, estrogênios, polímeros e outros, acabam de diversas maneiras contaminando corpos d'água. Esses produtos são um grande problema para as empresas de tratamento de água das grandes cidades.

Um sistema natural de tratamento de água, conhecido por *wetlands*, que utiliza plantas aquáticas (macrófitas) para remover poluentes, mostrou-se eficaz na eliminação de moléculas de difícil remoção. Esse estudo foi realizado em escala laboratorial para a remoção dos hormônios etinilestradiol (EE2) e levonorgestrel (LNG), e o composto químico bisfenol A (BPA), todos considerados contaminantes emergentes e de grande preocupação nas estações de tratamento de água. A maior eficiência de remoção dos interferentes foi obtida em um sistema que combinou minipapiro com carvão de bambu (Campos et al., 2019).

A tecnologia desenvolvida apresentou resultados muito promissores e tem grande potencial de aplicação, inclusive em comunidades rurais isoladas. No entanto, as *wetlands* ainda não são muito empregadas no Brasil (Campos et al., 2019).

### Bioindicadores de contaminação ambiental

A simples mensuração dos níveis de substâncias químicas presentes no ambiente não é suficiente para revelar os reais efeitos adversos da contaminação. Torna-se necessária a avaliação dos efeitos biológicos da contaminação em diversos níveis hierárquicos. A utilização de uma bateria de bioindicadores nos permite avaliar e for-

mular um retrato detalhado dos diferentes efeitos das diversas formas de poluição nos organismos aquáticos, sendo possível diferenciar o efeito dos agrotóxicos. Esses bioindicadores são definidos como componentes biológicos, células, processos bioquímicos, estruturas e funções biológicas, alteradas quando em contato com compostos xenobióticos. Indicadores em diferentes níveis de organização biológica fornecem informações complementares, necessárias para a análise de risco ecológico. A incorporação dos bioindicadores nos programas de vigilância e controle da contaminação ambiental do meio aquático proporcionará um conhecimento mais preciso da qualidade ambiental (Arias et al., 2007).

Torna-se necessário investigar as possibilidades de definir e utilizar uma abordagem integrada para avaliar o efeito tóxico de substâncias poluentes em ecossistemas aquáticos, através do desenvolvimento e aplicação de uma bateria de bioindicadores com quatro níveis de complexidade (comunidade, individual, celular e molecular), e, assim, determinar o grau de impacto causado no ecossistema de uma determinada área, utilizando peixes e macroinvertebrados como indicadores de efeitos biológicos (Arias et al., 2007).

Uma pesquisa descrita por Oliveira et al. (2016) avaliou o potencial do pólen apícola como bioindicador de contaminação ambiental por agrotóxicos. Para isso, dois métodos analíticos foram desenvolvidos e validados por QuEChERS e GC-MS/MS para quantificação de agrotóxicos, sendo um para 26 pesticidas, e o outro para 19. Nas amostras provenientes da estação experimental da Embrapa Meio Ambiente não foram quantificados nenhum dos pesticidas, porém foram detectados abaixo dos limites de quantificação dos métodos os pesticidas bioaletrina, em 4 amostras, e pendimetalina, em 18. Os pesticidas alacloro, aldrin, bioaletrina, endossulfan alfa, fempropatrim, permetrina e trifluralina foram detectados em 7 das 21 amostras provenientes de apicultores de Ribeirão Preto, SP. Como as abelhas percorrem longas distâncias, o pólen mostrou ser um possível bioindicador de contaminação ambiental.

### **Processos Oxidativos Avançados (POA's)**

Os Processos Oxidativos Avançados (POA's) são baseados na geração de radicais livres, principalmente o radical OH, com alto poder oxidante e que pode promover a degradação de vários compostos poluentes (Fioreze et al., 2014). Os POA's podem ser utilizados em conjunto com tratamentos biológicos, a fim de aumentar a biodegradabilidade de compostos recalcitrantes, diminuindo, assim, o tempo requerido para o tratamento via processos biológicos tradicionais (Morais; Zamora, 2005). Esses processos têm obtido grande atenção devido ao aumento da complexidade e dificuldade no tratamento de águas residuárias, o que tem sido motivo para a busca de novas

metodologias visando a remediação desses rejeitos, as metodologias de tratamento via Oxidação Avançada, dentre as quais estão: processos envolvendo  $H_2O_2$ , sistemas Fenton e Foto-Fenton, Fotocatálise Heterogênea e sistemas fundamentados na utilização de ozônio (Fioreze et al., 2014).

As principais vantagens destes processos estão em sua inespecificidade, podendo ser utilizados para degradar substratos de qualquer natureza química, na possibilidade de emprego para degradar poluentes cuja concentração seja muito baixa ( $\mu g L^{-1}$ ) e na não geração de resíduos. Algumas desvantagens são observadas, como os custos, que podem ser elevados, e a formação de subprodutos de reação (Fioreze et al., 2014).

No trabalho realizado por Assalin et al. (2016), a fotocatalise heterogênea solar utilizando  $TiO_2$  imobilizado foi aplicada no tratamento de efluentes agrícolas decorrentes da aplicação de formulações comerciais de metil paration. Por meio de análises por LC-MS/MS, o desaparecimento do ingrediente ativo, bem como a formação de seu metabólito, foram monitorados, ao passo que a eficiência de mineralização foi monitorada por medidas de carbono orgânico total (COT). O microcrustáceo *Artemia salina* foi utilizado nos estudos. A eficiência de remoção de COT pelo processo fotocatalítico foi de 48,5%. Após 45 minutos de tratamento, a eficiência de remoção do metil paration foi de 90%, sendo completamente mineralizado ao final do tratamento. Durante o processo fotocatalítico foi observada a formação e remoção do metabólito metil paraoxon. O tratamento fotocatalítico resultou em um aumento da mobilidade do microcrustáceo, indicando diminuição da toxicidade aguda, mostrando que esta tecnologia é eficiente para a degradação deste tipo de efluente.

No trabalho realizado por Martinez et al. (2015) foi estudada a degradação do hormônio 17- $\beta$ -estradiol presente em um efluente sintético de indústria de medicamentos farmacêuticos de uso veterinário, pelo processo fotooxidativo  $H_2O_2/UV$ . A degradação do 17- $\beta$ -estradiol, assim como a redução da carga orgânica do efluente, foram avaliadas. Vários ensaios foram realizados com variação da concentração de peróxido de hidrogênio, pH, e presença de radiação UV. Os melhores resultados foram obtidos em pH 5, concentração de  $H_2O_2$  de  $10 mg L^{-1}$  e com dose fixa de radiação UV de  $250,1 mWs (cm^2)^{-1}$ . Nessas condições, a eficiência de remoção do 17- $\beta$ -estradiol foi de aproximadamente 60% em 60 minutos, e a eficiência na remoção de COT foi de 45%. A principal contribuição foi que os resultados mostraram que o POA  $H_2O_2/UV$  se apresenta como uma tecnologia viável para o tratamento de efluentes contendo estradiol.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Química Analítica vem avançando cada vez mais no desenvolvendo e/ou aperfeiçoamento das técnicas analíticas, principalmente as cromatográficas, aliadas aos métodos de preparo de amostras eficientes, rápidos e robustos, como o QuEChERS,

para a determinação de resíduos e contaminantes em níveis muito baixos em diversos tipos de matrizes. De forma geral, essas recentes abordagens incluem as seguintes etapas: preparação da amostra, separação, e detecção para posterior quantificação dos analitos de interesse.

Essas novas estratégias têm mostrado serem capazes de atender às normas exigidas pelas agências reguladoras, que são responsáveis pelos programas de monitoramento de resíduos de contaminantes em alimentos e em amostras ambientais. Somente por meio de métodos sensíveis e confiáveis é que se torna possível assegurar a qualidade e segurança dos alimentos e assim proteger a saúde dos consumidores. As técnicas analíticas por meio da análise de alimentos possuem grande importância em toda a cadeia produtiva, pois atuam em vários segmentos do controle de qualidade, que envolve desde a produção do alimento no campo até a mesa do consumidor (in natura ou processado). Além disso, inúmeros métodos analíticos desenvolvidos e validados vêm sendo aplicados com sucesso em estudos envolvendo o comportamento de pesticidas no ambiente, programas de monitoramento de qualidade de água, estudos ecotoxicológicos, bioindicadores de qualidade ambiental, dentre outros.

As pesquisas apresentadas neste capítulo representam a atual situação em termos de análises de resíduos e contaminantes. Para que se mantenha neste patamar, é necessário que Embrapa continue reconhecendo a importância destes temas e mantenha os incentivos para a aprovação de projetos de pesquisa, parcerias com universidades, centros de pesquisas e empresas, além de programas de capacitação para aprimoramento na formação da equipe técnico-científica.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Programa de Análise de Resíduos de Agrotóxicos em Alimentos (PARA)**: relatório de atividades 2013-2015, 2016. Disponível em <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/agrotoxicos/programa-de-analise-de-residuos-em-alimentos/arquivos/3778jjson-file-1>. Acesso em: 02 de jun. 2021.
- AJKUMAR, P. K.; XIAO, W. H.; TYO, K. E. J.; WANG, Y.; SIMEON, F.; LEONARD, E.; MUCHA, O.; PHON, T. H.; PFEIFER, B.; STEPHANOPOULOS, G. Isoprenoid Pathway Optimization for Taxol Precursor Overproduction in *Escherichia coli*. *Science*. v. 300, p. 70-74, 2010.
- ALBUQUERQUE, A. F.; RIBEIRO, J. S.; KUMMROW, F.; NOGUEIRA, A. J. A.; MONTAGNER, C. C.; UMBUZEIRO, G. A. Pesticides in Brazilian freshwaters: a critical review. *Environmental Science: processes impacts*, v. 18, n. 7, p. 779-787, 2016.
- ALMEIDA, G. Pesquisador do Instituto Biológico participa da criação de método mais rápido e eficaz para análise de resíduos em alimentos, 2021. Disponível em: <http://www.biologico.agricultura.sp.gov.br/noticia/pesquisador-do-instituto-biologico-participa-da-criacao-de-metodo-mais-rapido-e-eficaz-para-analise-de-residuos-em-alimentos>. Acesso em: 29 de ag. 2021.
- ALMEIDA, M. Z. **Plantas medicinais**. Salvador, BA: EDUFBA, 2011. 221 p.
- ANASTASSIADES, M.; LEHOTAY, S. J.; STAJNBAHER, D.; SCHENCK, F.J. Fast and easy multiresidue method employing acetonitrile extraction/partitioning and “dispersive solid-phase extraction” for the determination of pesticide residues in produce. *Journal of AOAC International*, v. 86, n. 2, p. 412-431, 2003.
- ARIAS, A. R. L.; BUSS, D. F.; ALBURQUERQUE, C.; INÁCIO, A. F.; FREIRE, M. M.; EGLER, M.; MUGNAI, R.; BAPTISTA, D. F. Utilização de bioindicadores na avaliação de impacto e no monitoramento da contaminação de rios e córregos por agrotóxicos. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 12, n. 1, p. 61-72, 2007.
- ARIAS-ESTÉVEZ, M.; LÓPEZ-PERÍAGO, E.; MARTÍNEZ-CARBALLO, E.; SIMAL-GÁNDARA, J.; MEJUTO, J. C.; GARCÍA-RÍO, L. The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 123, n. 4, p. 247-260, 2008.
- ARTHUR, L. C.; PAWLISZYN, J. Solid phase microextraction with thermal desorption using fused silica optical fibers. *Anal. Chem*, v. 62, p. 2145-2148, 1990.
- ASSALIN, M. R.; FERRACINI, V. L.; QUEIROZ, S. C. do N. de; JONSSON, C. M.; CLEMENTE, Z.; SILVA, S. R. C. M. Photocatalytic degradation of an organophosphorus pesticide from agricultural waste by immobilized TiO<sub>2</sub> under solar radiation. *Revista Ambiente & Água*, v. 11, p. 778-787, 2016.
- ASSALIN, M. R.; QUEIROZ, S. C. DO N. DE; FERRACINI, V. L.; OLIVEIRA, T.; VILHENA, E.; MATTOS, M. L. T. A method for determination of imazapic and imazethapyr residues in soil using an ultrasonic assisted extraction and LC-MS/MS. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 93, p. 360-364, 2014.
- ASSALIN, M. R.; SANTOS, A. A. M.; QUEIROZ, S. C. do N. de. Optimization and validation of an analytical method for determination of herbicides residues in elephant grass. *Austin Environmental Sciences*, v. 5, n. 2, p. 1049, 2020.

BARBOSA, A. M. C.; SOLANO, M. DE L. M.; UMBUZEIRO, G. DE A. Pesticides in drinking water: the brazilian monitoring program. **Frontiers in Public Health**, v. 3, n. 246, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.3389/fpubh.2015.00246>.

BARIZON, R. R. M.; FIGUEIREDO, R. O.; DUTRA, D. R. C. S.; REGITANO, J. B.; FERRACINI, V. L. Pesticides in the surface waters of the Camanducaia River watershed. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 55, n. 3, p. 283-292, Nov. 28, 2019.

BARTIKOVA, H.; PODLIPNA, R.; SKALOVA, L. Veterinary drugs in the environment and their toxicity to plants. **Chemosphere**, v. 144, p. 2290-2301, 2016.

BATISTA, R. C.; FERNANDES, M. A. M.; GILAVERTTE, S.; QUEIROZ, C. S. do N. de; FERRACINI, VERA L.; REYES, F. G. R. Determination of moxidectin in serum by liquid chromatography-tandem mass spectrometry and its application in pharmacokinetic study in lambs. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 28, p. 250-256, 2017.

BONANSEA, R. I.; MARINO, D. J. G.; BERTRAND, L. D.; WUNDERLIN, A.; AMÉ, M. V. Tissue-specific bioconcentration and biotransformation of *Cypermethrin* and *Chlorpyrifos* in a native fish (*Jenynsia multidentata*) exposed to these insecticides singly and in mixtures, **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 36, n. 7, p. 1764-1774 jul. 2017.

BORGES, K. B.; FIGUEIREDO, E. C.; QUEIROZ, M. E. C. **Preparo de amostras para análise de compostos orgânicos**. Rio de Janeiro, RJ: GEN LTC, 2015. 288 f.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 18 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, n. 053, seção 1, p. 58, 18 mar. 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888**, de 4 de maio de 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 11 ago. 2021.

BRASIL. Portaria MS de Consolidação nº 05, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. **Diário Oficial da União**, n. 190, seção 1, 3 out. 2017.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **AGROFIT- Sistema de Agrotóxicos Fitossanitário**. Disponível em: [https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit\\_cons/principal\\_agrofit\\_cons](https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons). Acesso em: 18 abr. 2024.

BUSTILLOS, O. V. A cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas em Tandem HPLC-MS/MS. **Analytica**, edição 106, p. 34-35, 2020. Disponível em: <https://revistaanalytica.com.br/analytica-106/>. Acesso em: 10 ago. 2021.

CAMPOS, J. M.; QUEIROZ, S. C. do N. de; ROSTON, D. M. Removal of the endocrine disruptors ethinyl estradiol, bisphenol A, and levonorgestrel by subsurface constructed wetlands. **Science of the Total Environment**, v. 693, n. 133514, p. 133, 2019.

CARNEIRO, F. F.; RIGOTTO, R. M.; AUGUSTO, L. G. S.; FRIEDRICH, K.; BURIGO, A. C. **Dossiê Abrasco: um alerta sobre os impactos dos agrotóxicos na saúde**. Rio de Janeiro: Escola Politécnica de Saúde Joaquim Venâncio, Fundação Oswaldo Cruz/Expressão Popular, 2015. 624 p. Disponível em:

[https://www.abrasco.org.br/dossieagrotoxicos/wp-content/uploads/2013/10/DossieAbrasco\\_2015\\_web.pdf](https://www.abrasco.org.br/dossieagrotoxicos/wp-content/uploads/2013/10/DossieAbrasco_2015_web.pdf). Acesso em: 11 ago. 2021.

CARRO, A. M.; FERNÁNDEZ S.; RACAMONDE, I.; GARCÍA-RODRÍGUEZ, D.; GONZÁLEZ, P.; LORENZO, R. A. Dispersive liquid–liquid microextraction coupled with programmed temperature vaporization-large volume injection-gas chromatography–tandem mass spectrometry for multiclass pesticides in water. *Journal of Chromatography A*, v. 1253, p. 134-143, Aug. 2012.

CEMBER, H.; CURTIS, E. H.; GORDON BLAYLOCK, B. Mercury bioconcentration in fish: Temperature and concentration effects. *Environmental Pollution*, v. 17, n. 4, p. 311-319, Dec. 1978.

CERDEIRA, A. L.; PARAÍBA, L. C.; QUEIROZ, S. C. do N. de; MATALLO, M. B.; FRANCO, DANIEL ANDRADE S.; FERRACINI, V. L. Estimation of herbicide bioconcentration in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Ciência Rural*, v. 45, p. 591-597, 2015.

CETESB. **Diagnóstico da contaminação de águas superficiais, subterrâneas e sedimentos por agrotóxicos.** Disponível em: [https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/10/Diagnostico-da-Contaminacao-de-Aguas-Superficiais-Subterraneas-e-Sedimentos-por-Agrotoxicos\\_.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/10/Diagnostico-da-Contaminacao-de-Aguas-Superficiais-Subterraneas-e-Sedimentos-por-Agrotoxicos_.pdf). Acesso em: 11 de ag. 2021.

CHIARADIA, M. C.; COLLINS, C. H.; JARDIM, I. C. S. O estado da arte da cromatografia associada à espectrometria de massas acoplada à espectrometria de massas na análise de compostos tóxicos em alimentos. *Química Nova*, v. 31, 623- 636, 2008.

CODEX ALIMENTARIUS INTERNATIONAL FOOD STANDARDS. **Report of the 37th session of the Codex Committee on Pesticide Residues.** Hague, v. 18, n. 23, 121 p., 2005.

CODEX ALIMENTARIUS INTERNATIONAL FOOD STANDARDS. **Report of the 45th session of the Codex Committee on Pesticide Residues.** Beijing, v. 6, II, 148 p., 2013.

CONCENÇO, G.; VIVIAN, R.; IKEDA, F. S.; PIZZUTTI, I. R.; VELA, G. M. E.; FERRACINI, V. L.; NORA, L.; CECCON, G.; CONCENÇO, F.I.G.R. Herbicide residues of pre-harvest burndown in cowpea bean (*Vigna unguiculata*) grains. *Experimental Agriculture*, v. 56, p. 1-13, 2020.

CROTTI, A. E. M.; VESSECCHI, R.; LOPES, J. L. C. L.; LOPES, N. P. Espectrometria de massas com ionização por “electrospray”: processos químicos envolvidos na formação de íons de substâncias orgânicas de baixo peso molecular. *Química Nova*, v. 29, n. 2, abr. 2006.

DACAL, A. A.; BERRIEL, C. R.; DÍAZ, D. R.; SUARÉZ, M. M.; LUZARDO, O. P. Optimization and validation of a QuEChERS-based method for the simultaneous environmental monitoring of 218 pesticide residues in clay loam soil, *Science of the Total Environment*, v. 753, 142015, 2021.

DELLAMATRICE, P. M.; MONTEIRO, R. T. R. Principais aspectos da poluição de rios brasileiros por pesticidas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 12, p. 1296-1301, 2014.

DUTRA, D. R. C. S.; ASSALIN, M. R.; SANTOS R. S.; DORES, E. F. G. C. Method validation for multiresidue pesticide determination in riverbed sediment using QuEChERS and GC-MS/MS and application in samples from an important watershed in Central Western Brazil, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, v. 100, n. 13, p. 1536-1548, Aug. 28, 2019.

EURACHEM; CITAC. **Quantifying uncertainty in analytical measurement**. 3. ed. 2012. 133 p. (EURACHEM / CITAC Guide CG4S). Disponível em: [https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/QUAM2012\\_Pr.pdf](https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/QUAM2012_Pr.pdf).

EUROPEAN COMMISSION. **Commission Decision (EC) no 657/2002 of 12 August 2002 implementing Council Directive 96/23/EC concerning the performance of analytical methods and the interpretation of results**. 2002. 29 p. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ed928116-a955-4a84-b10a-cf7a82bad858/language-en>. Acesso em: 01 ago. 2021.

EUROPEAN COMMISSION. Safety of the Food Chain Pesticides and biocides SANTE/11813/2017 (21–22 November 2017 rev.0). Guidance document on analytical quality control and method validation procedures for pesticides residues analysis in food and feed. 2017.

FENNER, K.; CANONICA, S.; WACKETT, L. P.; ELSNER, M. Evaluating pesticide degradation in the environment: blind spots and emerging opportunities. *Science*, v. 341, n. 6147, p. 752–758, 2013.

FERRACINI, V. L.; QUEIROZ, S. C. do N. de; ROSA, M. A.; DORNELLAS, M. M.; QUEIROZ, J. F.; PARAÍBA, L. C. Análise de agrotóxicos organoclorados em camarão e pescado por cromatografia a gás com detector de micro captura de elétrons (GC- ECD). *Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, v. 24, p. 13-20, 2014.

FERRACINI, V. L.; QUEIROZ, S. C. do N. de; ROSA, M. A.; LOPES, P. R. C. Determinação de resíduos de paclobutrazol em manga (*Mangifera indica L.*) por cromatografia acoplada a espectrometria de massas (LC-MS/MS). *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, v. 58, p. 1-16, 2011.

FERRAZ, D. R.; ANDREOLA, R. Análise de agrotóxicos e parâmetros físico-químicos em águas de irrigação de cultivo orgânico. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 11., 29 a 30 out. 2019, Maringá. Disponível em: <https://rdu.unicesumar.edu.br/bitstream/123456789/3732/1/Roberto%20Delatorre%20Ferraz.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2021.

FERREIRA, J. A.; FERREIRA, J. M. S.; TALAMINE, V.; FACCO, J. F.; RIZZETTI, T. M.; PRESTES, O. D.; ZANELLA, R.; ADAIME, M. B.; BOTTOLI, C. B. G. Determination of pesticides in coconut (*Cocos nucifera Linn.*) water and pulp using modified QuEChERS and LC-MS/MS. *Food Chemistry*, v. 213, p. 616–624, Dec. 2016.

FERREIRA, J. A.; QUEIROZ, S. C. do N. de. Multiresidue method for determination of pesticides in coconut (*Cocos nucifera Linn.*) endosperm by using GC-MS/MS and UHPLC-MS/MS analysis. *Journal Of Food Composition and Analysis*, v. 97, p. 103764, 2021.

FERRER, C.; LOZANO, A.; AGÜERA, A.; GIRÓN, A. J.; FERNÁNDEZ-ALBA, A. R. Overcoming matrix effects using the dilution approach in multiresidue methods for fruits and vegetables. *Journal of Chromatography A*, v. 1218, n. 42, p. 7634–7639, Jul. 2011.

FIGLIANO, M.; SANTOS, E. P.; SCHMACHTENBERG, N. Processos oxidativos avançados: fundamentos e aplicação ambiental. *REGET/UFES: Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 18, n. 1, p. 79-91, abril 2014.

GERÓNIMO, E.; APARICIO, V. C.; BÁRBARO, S.; PORTOCARRERO, R.; JAIME, S.; COSTA, J. L. Presence of pesticides in surface water from four sub-basins in Argentina. *Chemosphere*, v. 107, p. 423–431, 2014.

HASHIMOTO, J. C.; PASCHOAL, J. A. R.; QUEIROZ, S. C. do N. de; FERRACINI, V. L. . A Simple method for the determination of malachite green and leucomalachite green residues in fish by a modified QuEChERS extraction and LC/MS/MS. **Journal of AOAC International**, v. 95, p. 913-922, 2012.

HERMIDA, C.; PELAEZ, V.; SILVA, L. da. Limites de resíduos de agrotóxicos e barreiras técnicas comerciais. **Agroalimentaria**, v. 21, n. 41, p. 151-170, 2015.

HRYNKO, I.; KACZYNSKI, P.; LOZOWICKA, B. A global study of pesticides in bees: QuEChERS as a sample preparation methodology for their analysis – Critical review and perspective, **Science of The Total Environment**, v. 792, 148385, Oct. 2021.

HUNT, L.; BONETTO, C.; RESH, V. H.; FORSIN, D.; FANELLI, S.; MARROCHI, N.; LYDY, M. J. Science of the Total Environment Insecticide concentrations in stream sediments of soy production regions of South America. **Science of the Total Environment**, 547, 114–124, 2016.

INMETRO. **Orientações sobre validação de métodos de ensaios químicos**. DQO-CGRE-008, 2007.

ITURBURU, F. G., CALDERON, G.; AMÉ, V.; MENONE, M. L. Ecological Risk Assessment (ERA) of pesticides from freshwater ecosystems in the Pampas region of Argentina: legacy and current use chemicals contribution. **Science of the Total Environment**, v. 691, p. 476–482, 2019.

JEANNOT, M., A.; CANTWELL, F. F. Solvent microextraction into a single drop. **Analytical Chemistry**, v. 68, n. 13, p. 2236-2240, Jul.1996.

Ji, B.; ZHAO, W.; XU, X.; HAN, Y.; JIE, M.; XU, G.; BAI, Y. Development of a modified quick, easy, cheap, effective, rugged, and safe method based on melamine sponge for multi-residue analysis of veterinary drugs in milks by ultra-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry, **Journal of Chromatography A**, v. 1651, 462333, Jun. 2021.

JONSSON, C. M. **Estudos de toxicidade e acúmulo de endossulfan nos peixes *Brachydanio rerio* e *Hyphessobrycon bifasciatus***. 1991. 179 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Unicamp, Campinas.

JONSSON, C. M.; MOURA, M. A. M.; FERRACINI, V. L.; PARAÍBA, L. C.; ASSALIN, M. R.; QUEIROZ, S. C. do N. Bioconcentrations of herbicides used in sugarcane crops in tilapia (*Oreochromis niloticus*) and the risk for human consumption. **Heliyon**, v. 5, p. e02237, 2019.

LAABS, V.; WEHRHAN, A.; PINTO, A.; DORES, E.; AMELUNG, W. Pesticide fate in tropical wetlands of Brazil: an aquatic microcosm study under semi-field conditions. **Chemosphere**, v. 67, n. 5, p. 975–989, 2007.

LANÇAS, F. M. **Extração em fase sólida (SPE)**. São Carlos: RiMa; 2004. 93 p. Disponível em: <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-443289>. Acesso em: 20 jul. 2021.

LEHOTAY, S. J.; SON, K. A.; KWONB, H.; KOESUKWIWATA, U.; FU, W.; MASTOVSKA K.; HOHA, E.; LEEPIPATIBOON, N. Comparison of QuEChERS sample preparation methods for the analysis of pesticide residues in fruits and vegetables. **Journal of Chromatography A**, v. 1217, n. 16, p. 2548-2560, 2010.

LEWIS, S. E.; SILBURN D. M.; KOOKANA, R. S.; MELANIE SHAW. Pesticide behavior, fate, and effects in the tropics: an overview of the current state of knowledge. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 64, n. 20, p. 3917-3924, 2016.

LI, J.; ZHANG, Z.; ZHANG, B.; FAN, C. Use of a headspace solid phase microextraction - based methodology followed by gas chromatography-tandem mass spectrometry for pesticide multiresidue determination in teas. *Chromatographia*, v. 81, p. 809-821, 2018.

LOPES, C. V. A.; ALBUQUERQUE, G. S. C. Desafios y avances en el control de residuos de pesticidas en Brasil: 15 años del Programa de Análisis de Residuos de Pesticidas en Alimentos. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 37, n. 2, 2021.

MACHADO, K. C.; GRASSI, M. T.; VIDAL, C.; PESCARA, I. C.; JARDIM, W. F.; FERNANDES, A. N.; SODRÉ, F. F.; ALMEIDA, F. V.; SANTANA, J. S.; CANELA, M. C.; NUNES, C. R. O.; BICHINHO, K. M.; SEVERO, F. J. R. A preliminary nationwide survey of the presence of emerging contaminants in drinking and source waters in Brazil. *Science of the Total Environment*, v. 572, p. 138-146, 2016.

MAGALHÃES, I.R.S.; OLIVEIRA, A.R.M.; BONATO, P.S. Fundamentos e avanços recentes da microextração em fase líquida empregando membranas cilíndricas ocas (LPME). *Scientia Chromatographica*, v. 1, n. 4, p. 11-17, 2009.

MARTINS, M. L.; PRIMEL, E. G.; CALDAS, S. S.; PRESTES, O. D.; ADAIME, M. B. E ZANELLA, R. Microextração líquido-líquido dispersiva (DLLME): fundamentos e aplicações. *Scientia Chromatographica*, v. 4, n. 1, p. 35-51, 2012.

MARTINEZ, M. S.; NASCIMENTO, Q. S. C.; PIRES, J. Degradação fotooxidativa de 17-β-estradiol presente em efluente sintético de indústria de medicamentos hormonais veterinários por processo H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV. REEC. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 10, p. 1-10, 2015.

MELO, I. S. Agência Embrapa de Informação Tecnológica: Biodegradação. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arvore>. Acesso em: 17 ago. 2021.

MIELE, A.; RIZZON, L. A.; QUEIROZ, S. C. do N. de. A survey on the composition of wines made with grapes produced by an organic system. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 19, p. E2015031, 2016.

MIELE, A.; RIZZON, L. A.; QUEIROZ, S. C. do N. de; GIANELLO, C. Physicochemical composition, minerals, and pesticide residues in organic grape juices. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 35, p. 120-126, 2015.

MICHLIG, N.; LEHOTAY, S. J.; LIGHTFIELD, A. R.; BELDOMÉNICO, H.; REPETTI, M. R. Validation of a high-throughput method for analysis of pesticide residues in hemp and hemp products, *Journal of Chromatography A*, v. 1645, 462097, 2021.

MONTAGNER, C. C.; VIDAL, C.; ACAYABAB, R. D. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: Cenário atual e aspectos analíticos. *Química Nova*, v. 40, n. 9, p. 1094-1110, 2017.

MONTEIRO, R. T. R.; SILVA, G. H.; MESSIAS, T. G.; QUEIROZ, S. C. do N. de; ASSALIN, M. R.; SOUZA, D. R. C.; ALVES, C. H. R.; FERREIRA, A. C.; BLAISE, C. Chemical and ecotoxicological assessments of water samples before and after being processed by water treatment plant. *Revista Ambiente & Água*, v. 9, p. 6-18, 2014.

MONTEIRO, S. H.; LEHOTAY, S. J.; SAPOZHNIKOVA, Y.; NINGA, E.; LIGHTFIELD, A. R. High-throughput mega-method for the analysis of pesticides, veterinary drugs, and environmental contaminants by ultra-high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry and robotic mini-solid-phase extraction cleanup + low-pressure gas chromatography-tandem mass spectrometry, part 1: beef. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 69, n. 4, p. 1159-1168, Feb 3, 2021.

MORAES, M. C. B.; LAGO, C. L. Espectrometria de massas com ionização por “electrospray” aplicada ao estudo de espécies inorgânicas e organometálicas. **Química Nova**, v.26 (4), 2003.

MORAIS, J. L.; ZAMORA, P. P. Use of advanced oxidation processes to improve the biodegradability of mature landfill leachates. **Journal of Hazardous Materials**, v. 123, n. 1- 3, p. 181-186, Aug. 3, 2005.

NALLANI, G. C.; PAULOS, P. M.; CONSTANTINE, L. A.; VENABLES, B. J.; HUGGETT, D. B. Bioconcentration of ibuprofen in fathead minnow (*Pimephales promelas*) and channel catfish (*Ictalurus punctatus*), **Chemosphere**, v. 84, n. 10, p. 1371-1377, Sep. 2011.

NINGA, E.; SAPOZHNIKOVA, Y.; LEHOTAY, S. J.; LIGHTFIELD, A. R.; MONTEIRO, S. H. High-throughput mega-method for the analysis of pesticides, veterinary drugs, and environmental contaminants by ultra-high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry and robotic mini-solid-phase extraction cleanup + low-pressure gas chromatography-tandem mass spectrometry, part 2: catfish. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 69, n. 4, p. 1169-1174, 2021.

NOGUEIRA, J. M. F. Extração dortiva em barra de sgitação (SBSE): uma metodologia inovadora para microextração estática. **Scientia Chromatographica**, v. 4, n. 4, p. 259-269, 2012.

NUNES, K. S. D.; VALLIM, J. H.; ASSALIN, M. R.; QUEIROZ, S. C. do N. de; PARAÍBA, L. C.; JONSSON, C. M.; REYES, F. G. R. Depletion study, withdrawal period calculation and bioaccumulation of sulfamethazine in tilapia (*Oreochromis niloticus*) treated with medicated feed. **Chemosphere**, v. 197, p. 89-95, 2018.

OGBEIDE, O.; TONGO, I.; EZEMONYE, L. Risk assessment of agricultural pesticides in water, sediment, and fish from Owan River, Edo State, Nigeria. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, n. 10, p. 654, 2015.

OLIVEIRA, A. R. M.; MAGALHÃES, R. J.; SANTANA, F. J. M.; BONATO, P. S. Microextração em fase líquida (LPME): fundamentos da técnica e aplicações na análise de fármacos em fluidos biológicos. **Química Nova**, v. 31, n. 3, p. 637-644, 2008.

OLIVEIRA, R. C.; QUEIROZ, S. C. do N.; LUZ, C. F. P. da; PORTO, R. S.; RATH, S. Bee pollen as a bioindicator of environmental pesticide contamination. **Chemosphere**, v. 163, p. 525-534, 2016.

OMC. **Technical barriers to trade**: technical Information on technical barriers to trade. 2012. Disponível em: [http://www.wto.org/english/tratop\\_e/tbt\\_e/tbt\\_info\\_e.htm](http://www.wto.org/english/tratop_e/tbt_e/tbt_info_e.htm). Acesso em: 28 jul. 2021.

PAPADAKIS, E.; TSABOULA, A.; KOTOPOULOU, A.; KINTZIKOGLU, K.; VRYZAS, Z.; PAPADOPOULOU-MOURKIDOU, E. Science of the total environment pesticides in the surface waters of Lake Vistonis Basin, Greece : occurrence and environmental risk assessment. **Science of the Total Environment**, v. 1, n. 536, p. 793-802, Dec. 2015.

PARAÍBA, L. C.; QUEIROZ, S. C. do N. de; MAIA, A. H. N.; FERRACINI, V. L. Bioconcentration factor estimates of polycyclic aromatic hydrocarbons in grains of corn plants cultivated in soils treated with sewage sludge. *Science of the Total Environment*, v. 408, p. 3270-3276, 2010.

PARAÍBA, L. C.; QUEIROZ, S. C. do N. de; SOUZA, D. R. C.; SAITO, M. L. Risk simulation of soil contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons from sewage sludge used as fertilizers. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 22, p. 1156-1163, 2011.

PAYÁ, P.; ANASTASSIADES, M.; MACK, D.; SIGALOVA, I.; TASDELEN, B.; OLIVA, J.; BARBA, A. Analysis of pesticide residues using the Quick Easy Cheap Effective Rugged and Safe (QuEChERS) pesticide multiresidue method in combination with gas and liquid chromatography and tandem mass spectrometric detection. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, v. 389, p. 1697-1714, 2007.

PEDERSEN-BJERGAARD, S.; RASMUSSEN, K. E. Bioanalysis of drugs by liquid-phase microextraction coupled to separation techniques. *Journal of Chromatography B*, v. 817, n. 1, p. 3-12, 2005.

PETRARCA, M. H.; ROSA, M. A.; QUEIROZ, S. C. do N. de; GODOY, H. T. Simultaneous determination of acrylamide and 4-hydroxy-2,5-dimethyl-3(2 H)-furanone in baby food by liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, v. 1522, p. 62-69, 2017.

PICO, Y.; ALFARHAN, A. H.; BARCELO, D. How recent innovations in gas chromatography-mass spectrometry have improved pesticide residue determination: An alternative technique to be in your radar. *Trac Trends in Analytical Chemistry*, v. 122, 115720, 2020.

PINTO, M. A. L. Extração em ponteiras descartáveis: fundamentos teóricos e aplicações. *Scientia Chromatographica*, v. 7, n. 2, p. 101-108, 2015.

PRESTES, O. D.; FRIGGI, C. A.; ADAIME, M. B.; ZANELLA, R. QuEChERS: um método moderno de preparo de amostra para determinação multirresíduos de pesticidas em alimentos por métodos cromatográficos acoplados à espectrometria de massas. *Química nova*, v. 32, n. 6, p. 1620-1634, 2009.

QUEIROZ, M. E. C. Microextração em sorvente empacotado (MEPS) para a determinação de fármacos em fluidos biológicos. *Scientia Chromatographica*, v. 3, n. 3, p. 223-229, 2011.

QUEIROZ, S. C. do N. de; COLLINS, H.; JARDIM, I. C. S. F. Métodos de extração e/ou concentração de compostos encontrados em fluidos biológicos para posterior determinação cromatográfica. *Química Nova*, v. 24, n. 1, p. 68-76, 2001.

QUEIROZ, S. C. do N. de; FERRACINI, V. L.; ROSA, M. A. Validação de método multirresíduo para determinação de pesticidas em alimentos empregando QuEChERS E UPLC-MS/MS. *Química Nova*, v. 35, p. 185-192, 2012.

QUEIROZ, S. C. do N. de; SOUZA, D. R. C. de; CERDEIRA, A. L.; PARAÍBA, L. C. Validação de um método para determinação de resíduos de fungicidas em grãos de soja. *Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente*, 2017. 19 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 73).

REZAEI, M.; ASSADI, Y.; HOSSEINI, M. R. M.; AGHAEI, E.; AHMADI, F.; BERIJANI, S. Determination of organic compounds in water using dispersive liquid-liquid microextraction. *Journal of Chromatography A*, v. 1116, n. 1-2, 1-9, 2006.

- RIBANI, M.; BOTTOLI, C. B. G.; COLLINS, C. H.; JARDIM, I. C. S.; MELO, L. F. C. Validação em métodos cromatográficos e eletroforéticos, *Química Nova*, v. 27, n. 5, p. 771-780, 2004.
- RICE, P. J.; RICE, P. J.; ARTHUR, E. L.; BAREFOOT, A. C. Advances in pesticide environmental fate and exposure assessments. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 55, n. 14, p. 5367-5376, 2007.
- SAITO-SHIDAA, S.; NAGATAB M.; NEMOTOA S.; AKIYAMAA H. Quantitative analysis of pesticide residues in tea by gas chromatography-tandem mass spectrometry with atmospheric pressure chemical ionization. *Journal of Chromatography B*, v. 1143, 122057, 2020.
- SANTOS, D. M.; BURUAEM, L.; GONÇALVES, R. M.; WILLIAMS, M.; ABESSA, D. M. S.; KOOKANA, R.; De MARCHI, M. R. R. Multiresidue determination and predicted risk assessment of contaminants of emerging concern in marine sediments from the vicinities of submarine sewage outfalls. *Marine Pollution Bulletin*, v.129, p. 299-307, 2018.
- SHIROMA, L. S.; QUEIROZ, S. C. do N. de; JONSSON, C. M.; BOTTOLI, C. B. G. Extraction strategies for simultaneous determination of florfenicol and florfenicol amine in tilapia (*Oreochromis niloticus*) muscle: quantification by LC-MS/MS. *Food Analytical Methods*, v. 1, p. 1-12, 2019.
- SILVA, P. T. S.; SOUZA, D. R. C.; FERRACINI, V. L. Análises de multirresíduos de pesticidas em cebola empregando cromatografias líquida e gasosa acopladas à espectrometria de massas. *Boletim de Pesquisa*, v. 132, p. 1-21, 2017.
- SOUSA, S. A.; ALVES, S. F.; PAULA, J. A. M.; FIUZA, T. S.; PAULA, J. R.; BARA, M. T. Quantificação de taninos em extrato de guaraná (*Paullinia cupana*) realizado através de planejamento experimental. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, v. 20, p. 3-14, 2010.
- TANG, X.; ZHU, B.; KATOU, H. A review of rapid transport of pesticides from sloping farmland to surface waters: Processes and mitigation strategies. *Journal of Environmental Sciences*, v. 24, n. 3, p. 351-361, 2012.
- TANKIEWICZ, M. Determination of Selected Priority Pesticides in High Water Fruits and Vegetables by Modified QuEChERS and GC-ECD with GC-MS/MS Confirmation. *Molecules*, v. 24, n. 3, p. 1-16, Jan. 2019.
- TROVATO, V. W.; PORTILHO, I. I. R.; BARIZON, R. R. M.; SCORZA JÚNIOR, R. P. Herbicide runoff from a soil with different levels of sugarcane straw coverage in Brazil. *Ecotoxicology and Environmental Contamination*, v. 15, n. 1, p. 25-35, 2020.
- VALENTE, A. L. P.; AUGUSTO, F. Microextração por fase sólida. *Química Nova*, v. 23, n. 4, p. 523-530, 2000.
- VAZ, R. L.; BARIZON, R. R. M.; SOUZA, A., J. de; REGITANO, J. B. Runoff of hexazinone and diuron in green cane systems. *Water, Air & Soil Pollution*, v. 232, n. 8, p. 116, 2021.
- VOOGT, P.; MUIR, D. C. G.; WEBSTER, G. R. B. GOVERS, H. Quantitative structure-activity relationships for the bioconcentration in fish of seven polychlorinated dibenzodioxins, *Chemosphere*, v. 21, n. 12, p. 1385-1396, 1990.
- WAUCHOPE, R. D.; YEH, S.; LINDERS, J. B. H. J.; KLOSKOWSKI, R.; TANAKA, K.; RUBIN, B.; KATAYAMA, A.; KÖRDEL, W.; GERSTL, Z.; LANE, M.; UNSWORTH, J. B. Pesticide soil sorption parameters: theory, measurement, uses, limitations and reliability. *Pest Management Science*, v. 58, n. 5, p. 419-445, 2002.

WEBER, J.B. Properties and Behavior of Pesticides in Soil. In: HONEYCUTT, R.C.; SCHABACKER, D.J. **Mechanisms of pesticide movement into ground water**. Boca Raton: CRC Press, 2018. p. 15-42.

YANG, X.; VANDER ZEE, S. E. A. T. M.; GAI, L.; WESSELING, J. G.; RITSEMA, C. J.; GEISSEN, V. Integration of transport concepts for risk assessment of pesticide erosion. **Science of the Total Environment**, v. 551–552, p. 563–570, May 2016.

ZAO, W.; JIANG, R.; GUO, W.; GUO, C.; LI, S.; WANG, J.; WANG, S.; LI, Y. Screening and analysis of multiclass veterinary drug residues in animal source foods using UPLC-Q-exactive orbitrap/MS. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 107, p. 228-238, 2021.

ZHANG, R.; PEI, J.; ZHANG, R.; WANG, S.; ZENG, W.; HUANG, D.; WANG, Y.; ZHANG, Y.; YU, K. Occurrence and distribution of antibiotics in mariculture farms, estuaries and the coast of the Beibu Gulf, China: Bioconcentration and diet safety of seafood, **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 154, 27-35, 2018.

ZHOU, Y.; WU, J.; WANG, B.; DUAN, L.; ZHANG, Y.; ZHAO, W.; WANG, F.; SUI, Q.; CHEN, Z.; XU, D.; LI, Q.; YU, G. Occurrence, source and ecotoxicological risk assessment of pesticides in surface water of Wujin District (northwest of Taihu Lake), China. **Environmental Pollution, Part A**, v. 265, 114953, 2020.

PARTE III

# BIOPROSPECÇÃO E BIOTECNOLOGIA AMBIENTAL

*"A natureza não faz  
nada em vão"*  
Aristóteles



# BIOPROSPECÇÃO DE MICRORGANISMOS COM POTENCIAL DE USO NA AGRICULTURA

*Itamar Soares de Melo, Rodrigo Mendes, Kátia de Lima Nechet, Gileno Lacerda Vieira Junior, Danilo Tosta Souza, Juliane Fontana Koba e Vanessa Nessner Kavamura Noguchi*

## INTRODUÇÃO

Na agricultura moderna, práticas intensivas que garantem altos rendimentos requerem o uso extensivo de fertilizantes químicos e de agrotóxicos sintéticos que, associados aos impactos ao meio ambiente, têm onerado os custos de produção. De modo a suprir a carência de produtos fitossanitários de pragas, doenças e plantas invasoras, as indústrias têm intensificado seu foco na busca de bioinsumos, à base de microrganismos antagonistas, assim como microrganismos solubilizadores de nutrientes.

Nesse sentido, faz-se necessária a adoção de programas bem planejados de bioprospecção de novos microrganismos que realmente possam ser utilizados com eficiência em condições naturais de campo. É crucial a investigação de linhagens superiores com novos mecanismos de ação e que sejam altamente competitivas e que novos habitats sejam explorados para o isolamento de novas espécies. É importante que essa busca seja feita em ambientes onde as funções almejadas sejam um produto da evolução natural.

Esta pesquisa utiliza a bioprospecção, que é uma ferramenta de exploração e utilização de recursos biológicos que tem sido utilizada há muito tempo, permitindo a sobrevivência, a adaptação e a evolução da humanidade. Os microrganismos são excelentes recursos, uma vez que, dada sua ampla capacidade metabólica, podem adaptar-se a várias condições, possibilitando sua existência em vários ambientes, desde a interação com diversos hospedeiros (plantas e animais) até a colonização de ambientes considerados extremos do ponto de vista humano. Essa versatilidade possibilitou a divergência e a colonização de diferentes nichos, tornando-os um grupo extremamente diverso. Eles desempenham papel importante na sustentação da vida, desde a participação nos ciclos biogeoquímicos, interagindo com seu hospedeiro e impactando sua saúde e desenvolvimento, funcionando como minifábricas para produção de compostos de interesse farmacêutico, industrial e agrícola.

Embora seja um mercado promissor, os bioinsumos ora no mercado restringem-se a poucos gêneros/espécies de fungos e de bactérias. Como exemplo, podem-se citar aqueles voltados ao controle de insetos-praga: *Metarhizium*, *Beauveria*, *Entomophthora*, *Neozygites*, *Hirsutella*, *Isaria*, *Paecilomyces* e *Bacillus thuringiensis*. Para o biocontrole de doenças de plantas, citam-se: *Trichoderma*, *Clonostachys*, *Bacillus amiloliquefaciens*, *Paenibacillus* e *B. cereus*. Igualmente, poucas bactérias têm sido usadas para melhorar a produtividade, incluindo *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Paenibacillus* e *Burkholderia* (Rodríguez; Fraga, 1999). Em estudo recente, pesquisadores da Universidade de Indiana, nos Estados Unidos, estimaram que a Terra pode conter cerca de 1 trilhão ( $10^{12}$ ) de espécies microbianas, das quais 99,99% permanecem desconhecidas (Locey; Lennon, 2016). Como se percebe, ainda há muito a se descobrir, e essa grande biodiversidade propicia a oportunidade de explorá-la com sustentabilidade em benefício da sociedade.

Assim, a biodiversidade deve ser explorada como fonte de novos genes, enzimas, moléculas, agentes de controle biológico, pesticidas, inseticidas, inoculantes, entre outros, que possam ser aplicados nos mais diversos setores da economia. Pensando nisso, nos últimos anos, a Embrapa Meio Ambiente tem se destacado na bioprospecção de microrganismos dos mais diversos ambientes (Antártica, manguezais, Caatinga, Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica e marinhos) na busca por novos compostos e microrganismos que possam ser utilizados para o desenvolvimento de novas tecnologias com potencial uso na agricultura.

## A BIODIVERSIDADE COMO RECURSO PARA DESCOBERTA DE NOVOS BIOINSUMOS

Os insumos biológicos, em sua maioria, são derivados de microrganismos e seus metabólitos e recaem nas seguintes categorias: biopesticidas, bioestimulantes e biofertilizantes. Embora tenham ocorrido avanços extraordinários no uso de agentes de biocontrole que garantem uma agricultura menos dependente de agrotóxicos, ainda há muito a se avançar na busca de novos agentes microbianos e na descoberta de novos biofertilizantes. A demanda por bioestimulantes deve aumentar, haja vista a escassez de água e irregularidades da precipitação anual, além de aumento das temperaturas e salinidade dos solos. Por sua vez, os biopesticidas à base de microrganismos vivos também devem merecer atenção no sentido de bioprospectar novas espécies com características superiores. A diversidade de espécies microbianas ora no mercado ainda é muito reduzida, com uma base genética estreita e, há muito, sendo subcultivada. Contudo, é preciso estudar a estabilidade genética dessas linhagens. Para ter uma visão global sobre a reduzida diversidade de organismos no mercado de bioinseticidas,

há os seguintes gêneros: *Bacillus thuringiensis*, *B. sphaericus*, *Beauveria*, *Metarhizium*; para os *biofungicidas*, *Bacillus*, *Clonostachys* e *Trichoderma*. Nesse sentido, a exploração da biodiversidade visando a novos agentes biológicos deve ser dirigida baseando-se nas interações ecológicas, em que o caráter tenha surgido como uma evolução natural, e as buscas devem priorizar o isolamento de novas espécies/gêneros e, portanto, de novos clusters gênicos e novas substâncias bioativas.

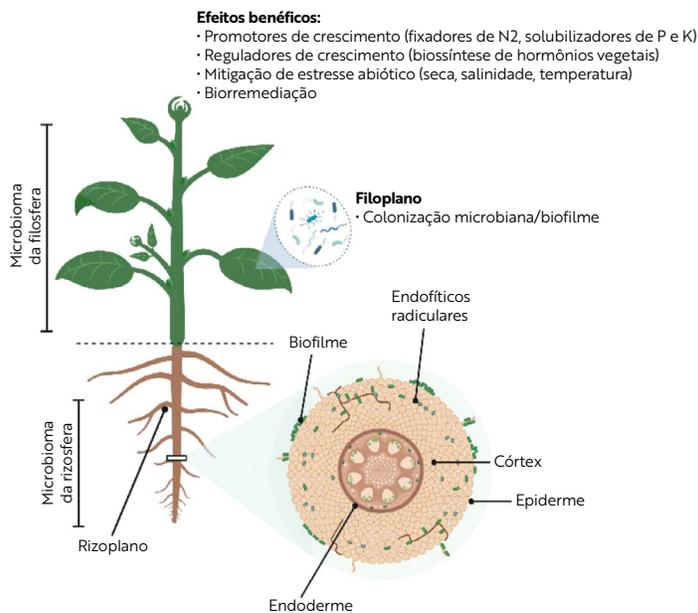
A maioria dos microrganismos permanece desconhecida, e vários habitats, inexplorados. Grande parte desses microrganismos ainda não são cultivados em meios de cultivo tradicionais, necessitando de estudos para acessar alguns grupos específicos. Diversos fatores contribuem para esse viés metodológico, como o fato de esses microrganismos frequentemente existirem em conjuntos interdependentes que funcionam como unidades metabólicas, já que esses cenários, até então, não podem ser replicados em condições de laboratório (Ainsworth et al., 2010). Ademais, os microrganismos em seus ambientes naturais existem em relações altamente específicas com seus hospedeiros, e a ausência de fatores-chave como metabólitos produzidos por outros membros da comunidade também dificulta o cultivo (Handelsman, 2004). É possível que muitos desses organismos sejam, de fato, mutantes auxotróficos, necessitando de requisitos nutricionais específicos.

Menos de 0,1% do total de espécies microbianas têm sido caracterizadas (Alain; Querellou, 2009). Portanto, buscar estratégias de isolamento em meios de cultivo considerando a fisiologia dos microrganismos presentes naquele ambiente é de suma importância. Uma estratégia para ampliar a diversidade de microrganismos cultiváveis é aumentar a diversidade de meios de cultivo para isolamento, que devem contemplar meios complexos, ricos em macro e micronutrientes, como também meios que sejam oligotróficos, principalmente para o isolamento de microrganismos extremofílicos. Bactérias psicrófilicas e bactérias do filo plano, por exemplo, devem ser isoladas em meios de cultivo diluídos. Assim, os meios de crescimento devem incluir baixas concentrações de sais minerais ou até mesmo a adição de extratos da própria planta hospedeira. As técnicas de isolamento baseadas em enriquecimento têm sido utilizadas no sentido de tornar as condições de crescimento mais favoráveis aos organismos de interesse, ao passo que desfavorecem o crescimento de quaisquer competidores. Igualmente, sugere-se a exploração de microrganismos com base nos critérios de quimiotaxonomia, a exemplo do que já se exercita com plantas, embora linhagens microbianas filogeneticamente próximas possam apresentar distintos perfis químicos quando os metabólitos secundários são levados em consideração. Uma abordagem inovadora refere-se à bioprospecção baseada no genoma do organismo de interesse, proporcionando a descoberta de genes que codificam a biossíntese de novas substâncias bioativas. Ademais, a abordagem metagenômica pode garantir acesso àquelas populações de microrganismos que não podem ser cultivadas em laboratório.

Reforça-se a importância da descoberta de novas espécies para o controle de nematoides, novos antibióticos naturais produzidos por fungos e bactérias para o controle de fitobactérias e plantas daninhas, novos bioestimulantes para proteção de plantas contra seca e salinidade e novos biofertilizantes envolvidos na solubilização de fosfato e de potássio.

## ESTRATÉGIAS DE BIOPROSPECÇÃO DE MICRORGANISMOS

Embora seja possível a exploração de microrganismos de diversos ambientes para uso agrícola, aqueles associados às plantas parecem oferecer efeitos superiores à saúde da planta, por colonizar suas respectivas plantas hospedeiras, inibir o ataque de pragas e produzir substâncias bioativas, como antibióticos voláteis e não voláteis e enzimas hidrolíticas, e soma-se a isso o fato de já serem adaptados à própria planta hospedeira. Os microrganismos que interagem e estão associados, simbiótica ou assimbioticamente, incluem os microrganismos da filosfera e da rizosfera e os endofíticos (Figura 16.1), pertencendo aos três domínios: arqueias, procaríotos e eucariotos.



**Figura 16.1.** Microbiomas da filosfera, da rizosfera e do interior dos tecidos vegetais (endofíticos). A imagem mostra os diferentes micro-habitats relativos a cada um desses *hot spots*, com suas funções essenciais ao crescimento e ao desenvolvimento de plantas e proteção contra pragas e estresses abióticos.

A exploração de agentes microbianos ou de seus metabólitos para uso agrícola tem sido realizada há décadas, com relativo sucesso a partir de fontes naturais, como o próprio solo. Recentemente, outros ambientes, muitos deles ainda pouco explorados, como ambientes marinhos ou até mesmo ambientes extremos, têm sido fontes de descoberta de novos organismos. Mais de 50% de todos os produtos no mercado são originários de produtos naturais.

## Microorganismos da filosfera

A filosfera é um dos ambientes mais hostis para o crescimento de microrganismos. É um ambiente extremo para grande parte dos microrganismos associados, pois os nutrientes na superfície foliar (filoplano) são extremamente escassos, e a exposição à dessecação e à radiação UV é igualmente extrema. A superfície foliar é quase duas vezes maior que a superfície da Terra, representando um habitat para microrganismos benéficos de importância para a agricultura, por exemplo, microrganismos tolerantes à radiação ultravioleta, e estresses osmóticos, sendo a maioria deles bactérias pertencentes a poucos grupos filogenéticos, incluindo as classes *Alphaproteobacteria* e *Gammaproteobacteria*. As bactérias são os organismos predominantes com uma densidade de  $10^6 - 10^7$  (Vorholt, 2012; Bringel; Cauée, 2015). É um habitat também para arqueias, fungos filamentosos e leveduras. A maioria das bactérias habitando a filosfera ocorre em grandes agregados, principalmente em micronichos, onde formam os biofilmes à base de substâncias poliméricas extracelulares. Alguns grupos são ubíquos simbiosiontes que colonizam a maioria das espécies vegetais, e certas espécies podem exibir determinadas características de importância à agricultura, como fixação de nitrogênio, produção de fito-hormônios, substâncias bioativas contra doenças e pragas. Bactérias metilotróficas, por exemplo, constituem os simbiosiontes predominantes no filoplano, os quais colonizam a maioria das espécies vegetais e têm demonstrado efeitos benéficos quanto à promoção do crescimento de plantas e, portanto, apresentam grande potencial de uso agrícola. Entre tantos atributos benéficos, as metilotróficas apresentam vantagem competitiva no filoplano, pois colonizam e competem na superfície foliar, toleram radiações, altas temperaturas, estresse hídrico e liberam substâncias bioativas de importância para o controle de fitopatógenos. Tem sido relatada a presença de bactérias fixadoras de nitrogênio na filosfera de muitas espécies de plantas agrícolas (Miyamoto et al., 2004). Na mesma linha de estudo, Mwijita et al. (2013) descobriram que mais de 50% das linhagens bacterianas isoladas da filosfera de arroz foram capazes de solubilizar fosfato. Desse modo, por sua natureza simbiótica e por serem bons colonizadores e tolerantes aos estresses abióticos intrínsecos à filosfera, atuam como excelentes probióticos à saúde da planta.

As buscas por microrganismos da filosfera para uso agrícola não têm recebido incentivos quando comparadas com as pesquisas voltadas aos organismos da rizosfera. O uso de antagonistas microbianos isolados do filoplano tem sido considerado uma das mais importantes alternativas de controle de doenças que ocorrem em pós-colheita. Os mecanismos de ação envolvidos no biocontrole incluem competição por espaço e nutrientes, micoparasitismo, liberação de substâncias bioativas, incluindo compostos voláteis e indução de resistência da planta hospedeira. No entanto, em virtude das propriedades benéficas, do caráter de adaptabilidade e de se requererem baixas doses de células, essa linha de pesquisa deve merecer atenção de pesquisadores e de produtores. É perfeitamente possível o uso combinado de linhagens com funções diversas, incluindo agentes promotores de crescimento de plantas e de agentes de controle biológico alinhados a doses adequadas de agrotóxicos.

### **Microrganismos da rizosfera**

A rizosfera foi definida no início do século XX, por Hiltner (1904), como o volume de solo que recebe influência das raízes das plantas, e, desde então, esse termo vem sendo cada vez mais investigado, sendo constituído por três unidades interagindo entre si: a planta, o solo e os microrganismos (Lynch, 1990). É uma área densamente colonizada por raízes que devem competir por água, espaço e nutrientes com as raízes de plantas vizinhas, além de ter de competir com os microrganismos presentes no solo (Ryan; Delhaize, 2001). Apresenta intensa atividade microbiana, decorrente da secreção de compostos denominados de exsudatos, pelas raízes, como íons, enzimas, mucilagem e diversos outros metabólitos (Bais et al., 2006). A composição da estrutura microbiana da rizosfera pode ser influenciada por inúmeros fatores, como a quantidade e o tipo de exsudatos radiculares, a espécie e a idade da planta, as condições do solo e as condições impostas pelo ambiente, sendo o efeito da planta altamente seletivo (Rovira, 1965; Marschner et al., 2004).

### **Microrganismos endofíticos**

São considerados microrganismos endofíticos aqueles que habitam o interior das plantas, podendo estabelecer relações simbióticas, neutras ou antagonistas com os hospedeiros (Petrini; Fisher, 1988). Os microrganismos endofíticos podem colonizar o interior das plantas em alguma fase de seu ciclo de vida, sendo encontrados em diversos órgãos e tecidos vegetais, como folhas, ramos e raízes, aparentemente, sem causar dano à planta hospedeira. Os endofíticos, assim como os fitopatógenos, apresentam a capacidade de penetrar a planta e se disseminar sistematicamente, habitando ativamente o apoplasto do hospedeiro. Entretanto, algumas contribuições significativas

para a viabilidade do vegetal foram atribuídas a esses microrganismos, que podem atuar como agentes de biocontrole de fitopatógenos e de insetos, na proteção da planta contra herbívoros, na produção de fito-hormônios e, ainda, atuar como otimizadores de crescimento e enraizamento da planta hospedeira, assim como elevar sua resistência a estresses bióticos e abióticos (Azevedo et al., 2000; Hallmann et al., 1997). A comunidade endofítica exerce esses efeitos favoráveis na planta porque é capaz de produzir compostos químicos como enzimas, alcaloides, antibióticos e diferentes metabólitos, os quais favorecem a adaptação da planta em condições adversas. A síntese dessas substâncias é induzida por condições de estresse da planta hospedeira, como falta de água, presença de substâncias tóxicas ou ataque de patógenos ou insetos, que afetam a interação da planta com o meio ambiente.

A constatação de comunidades microbianas endofíticas em tecidos de plantas saudáveis tem sido relatada para a maioria das espécies vegetais cultivadas. Fungos e bactérias são os endofíticos mais comumente isolados, contudo, outros grupos microbianos, como arqueias, têm sido isolados mais recentemente (Ma et al., 2013). Os gêneros mais comumente isolados incluem alguns pertencentes ao filo Ascomycota e outros gêneros, como *Colletotrichum*, *Xylaria*, *Phomopsis*, *Fusarium*, *Pestalotiopsis*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Pseudomonas* e *Xantomonas* (Rodrigues et al., 2000; Zou et al., 2000; Jacobs et al., 1985; McInroy; Kloepper, 1995). O número de espécies de microrganismos endofíticos isolados de determinada planta está diretamente associado à parte do hospedeiro que é utilizada no isolamento. Diferenças nas flutuações populacionais de endofíticos têm sido associadas ao genótipo das plantas, às condições ambientais e a seus locais de origem.

## ETAPAS DECISIVAS PARA A SELEÇÃO DE MICRORGANISMOS COM POTENCIAL DE USO NA AGRICULTURA

Uma etapa crucial na exploração de linhagens superiores para uso no controle biológico e/ou promotores do crescimento de plantas é o *screening* de bons candidatos. O objetivo focal da busca deve guiar os métodos de seleção. Para o controle biológico de doenças de plantas, por exemplo, é fundamental o conhecimento acurado do patossistema a ser estudado. Entretanto, todas as fases de bioprospecção são igualmente importantes, desde as coletas, métodos de isolamento e de *screening*, até testes toxicológicos e de estabilidade genética e desenvolvimento de formulações apropriadas (Figura 16.2). Recentemente, a combinação de avanços em edição genômica, como o *clustered regularly interspaced short palindromic repeats* (CRISPR), engenharia metabólica e metabolômica conduz à descoberta de novos compostos e expressões fenotípicas de mecanismos para os mais diversos usos de táxons ainda não explorados (Cortes et al., 2021; Carrol; Zhou, 2017).

A bioprospecção de agentes de controle biológico costuma ser baseada na busca por microrganismos que apresentam alta produção de estruturas reprodutivas e/ou metabólitos secundários. Os fungos estão entre os principais agentes de controle biológico de patógenos e insetos-praga, amplamente estudados e, em alguns casos, comercialmente explorados como bioprodutos (Hyde, 2019; Jaber; Ownley, 2018). Outros táxons também são extensivamente estudados, como as bactérias, principalmente as do gênero *Bacillus* (Ongena; Jackes, 2008), e as actinobactérias, que são reconhecidas por seu amplo espectro de produção de metabólitos secundários (Jose et al., 2021).

Antagonistas com potencial para controle de doenças foliares ou que ocorrem em pós-colheita podem ser obtidos do próprio habitat onde se pretende aplicá-los, já que esses organismos podem apresentar vantagens competitivas. As leveduras constituem bons antagonistas para doenças pós-colheita, pois apresentam inúmeros mecanismos de ação, incluindo competição por espaço e por nutrientes, liberação de enzimas hidrolíticas que favorecem a lise de fungos fitopatogênicos e formação rápida de biofilmes (Wisniewski et al., 2007). Além desses atributos, as leveduras são organismos extremamente tolerantes aos estresses abióticos prevalentes na filosfera. Do mesmo modo, para doenças radiculares e doenças vasculares, uma boa estratégia de busca pode ser a partir de solos supressivos, caso esse fenômeno ocorra em áreas próximas e/ou adjacentes onde ocorrem as doenças. Geralmente, quando a doença se estabelece, causa baixo dano e com tendência de redução dessa incidência a cada ciclo de cultivo mesmo na presença do patógeno, hospedeiro suscetível e ambiente favorável (Schlatter et al., 2017). As doenças vasculares causadas por fungos dos gêneros *Verticillium* e *Fusarium*, por exemplo, são de difícil controle, já que suas estruturas de dormência permanecem viáveis por longos períodos no solo. Uma vez que tenham infectado os tecidos vasculares, a planta inicia o processo de murcha e, portanto, o controle é bastante difícil. Nesse caso, o controle deve ser voltado à redução das fontes de inóculo presente no solo, sendo uma estratégia promissora que os antagonistas atuem por antibiose e micoparasitismo e que colonizem os micro-habitats de infecções do patógeno, ao tempo que podem, adicionalmente, proteger a planta por aumentar a resistência induzida. Alguns fungos e bactérias antagonistas têm sido aplicados com sucesso visando ao controle das murchas de *Verticillium* e *Fusarium*. Bactérias dos gêneros *Bacillus* e *Streptomyces* são agentes de controle de fitopatógenos pela produção de uma variedade de moléculas bioativas antagonônicas e pela capacidade de produzir esporos que permitem a adaptação a diversos ambientes, aumentando a probabilidade de seus estabelecimentos nos solos supressivos (Nwokolo et al., 2021).

Não existem protocolos-padrão para bioprospectar linhagens superiores a partir da biodiversidade, mas os testes iniciais de triagem são considerados cruciais para obtenção de inoculantes eficazes em condições de campo. É importante obter o máximo de informações possíveis sobre as coletas, como latitude, longitude e altitude, e

relacionar dados sobre o clima e análises físico-químicas do solo. Se as coletas forem realizadas em campos agrícolas, é preciso relacionar as práticas agrícolas adotadas, como fertilizantes e agrotóxicos.

Para isolamento de microrganismos, é essencial recuperar novos gêneros/espécies adotando certos procedimentos para maximizar a diversidade daqueles organismos raros ainda não cultiváveis. Alguns procedimentos de isolamento têm apresentado sucesso em isolar tais organismos, incluindo, por exemplo, baixas concentrações de nutrientes, moléculas sinalizadoras ou inibidores de organismos não desejáveis (Stevenson et al., 2004). Adicionalmente, aconselha-se estender a incubação por longos períodos, às vezes por até meses, para isolamento de bactérias oligotróficas.



**Figura 16.2.** Etapas cruciais envolvidas na busca de agentes de controle biológico a partir de amostras ambientais.

O princípio básico para isolamento é proceder à simulação do ambiente natural daqueles organismos a serem estudados, no sentido de estimular o crescimento. A maioria dos meios-padrão de cultivo geralmente utilizados, são extremamente ricos em nutrientes e, assim, estimulam o crescimento de microrganismos de rápido crescimento. Tem-se verificado que muitas bactérias de amostras ambientais têm sido isoladas em meios diluídos. Uma estratégia interessante é proceder à autoclavagem do ágar separadamente do fosfato que compõe o meio de cultivo. Durante a autoclavagem, produtos do ágar reagem com o fosfato produzindo peróxido de hidrogênio, que inibe o crescimento de bactérias que não produzem catalase (Tanaka et al., 2014).

Outra estratégia para maximizar o isolamento de novas espécies é suprir os meios de cultivo com cofatores e fatores de crescimento. Alguns microrganismos requerem, para seu crescimento e desenvolvimento, nutrientes específicos que estão presentes em seus ambientes naturais como cofatores. Desse modo, bactérias previamente não cultiváveis foram isoladas de solos e água (Stewart, 2012). Outro procedimento que tem sido empregado com sucesso é o cocultivo com outras bactérias. Em ambiente naturais, os microrganismos não existem isoladamente, e muitos destes, que ainda não têm sido cultivados em laboratório, devem ser isolados e cultivados em conjunto com outros microrganismos, porque alguns microrganismos dependem de substâncias produzidas por outros microrganismos para seu crescimento.

Uma técnica mais inovadora de isolamento que tem sido utilizada com bastante sucesso é o cultivo de alto rendimento, que emprega microcápsulas de agarose para encapsular células individualizadas diretamente de amostras ambientais. A técnica consiste em transferir as microcápsulas para colunas de minifermentadores para crescimento e desenvolvimento de microcolônias. A coluna do fermentador é, então, suprida com o meio de cultura que contém concentrações de nutrientes similares àqueles encontrados no ambiente do qual as células foram coletadas. Geralmente, essa técnica favorece o crescimento de espécies de crescimento lento. A técnica tem sido muito utilizada para cultivo de microrganismos produtores de substâncias bioativas (Keller; Zengler, 2004).

Se, por um lado, o controle biológico de doenças e insetos-praga tem extensa variedade de estudos, com resultados conhecidos e, em alguns casos, até mesmo bioprodutos comercializados, o desenvolvimento de bio-herbicidas ainda apresenta muitos desafios para ser inserido como estratégia de manejo integrado de plantas daninhas nos sistemas de produção. Embora existam várias pesquisas na literatura científica para diferentes plantas-alvo, poucos bio-herbicidas foram registrados e estão comercialmente em uso na agricultura mundial, em função de vários obstáculos para seu desenvolvimento (Westwood et al., 2018; Morin, 2020). A seleção de potenciais mico-herbicidas é feita pela identificação de microrganismos associados à planta-alvo em condições naturais, isolamento e cultivo em meio seletivo, determinação de condições favoráveis ao desenvolvimento da doença e posterior desenvolvimento de uma formulação.

Na Embrapa Meio Ambiente, as cordas de viola (*Ipomoea* spp.) vêm sendo investigadas como plantas-alvo para estudos de controle biológico com o uso de fungos fitopatogênicos. Essas espécies são importantes invasoras em áreas de cana crua, uma vez que apresentam capacidade de germinar sob a camada de palha que se forma em áreas de cana-de-açúcar manejadas sem queima (Correia; Kronka, 2010). Em levantamento da microbiota associada às cordas de viola, Nechet et al. (2019) identificaram 17 associações de fungos restritas aos gêneros *Bipolaris*, *Colletotrichum* e *Cercospora*, causando manchas foliares e *Alternaria*, causando amarelecimento e queima foliar. A patogenicidade dos isolados foi verificada em *Ipomoea hederifolia*, *I. nil*, *I. quamoclit* e *I. grandifolia*, e um isolado de *Cercospora* aff. *canescens* (CMAA 1444) foi selecionado por causar mancha foliar (cercosporiose), seguido de desfolha em *I. hederifolia*, *I. nil* e *I. grandifolia*.

As condições necessárias para o desenvolvimento da cercosporiose foram identificadas e uma suspensão de  $2 \times 10^7$  conídios.mL<sup>-1</sup> nos estádios fenológicos de 3-5 folhas, flores abertas e plantas com frutos, e um período de molhamento foliar de 24 horas induzem maior incidência da doença e posterior desfolha em *I. Nil*. Nas outras espécies, embora tenha ocorrido incidência da doença, a desfolha não foi a mesma, e é necessária a continuidade dos estudos explorando outros aspectos, como o uso de adjuvantes e a tecnologia de aplicação (Nechet; Halfeld-Vieira, 2019).

Complementar ao uso direto do patógeno, a equipe da Embrapa Meio Ambiente visa, também, à identificação de metabólitos secundários no processo otimizado, os quais podem aumentar a infectividade do inóculo produzido e, também, resultar na obtenção de produtos naturais de ação herbicida que podem ser utilizados diretamente no controle das plantas. O gênero *Cercospora* é conhecido pela produção da fitotoxina cercosporina, do grupo químico perylenequinonas, que desempenha papel fundamental no processo de infecção do patógeno em plantas (Daub, 1982). As fitotoxinas são determinantes em algumas interações patógeno e hospedeiro e podem ser específicas ao hospedeiro, como a AAL-toxin de *Alternaria alternate*, ou não específicas, como as produzidas pelo gênero *Fusarium* (Bo Bo et al., 2020).

A demanda por métodos alternativos aos herbicidas químicos aumenta a cada ano com o aparecimento de biótipos resistentes e de difícil controle nos sistemas convencionais e com o aumento de cultivos agroecológicos e orgânicos que não têm opção de controle de plantas daninhas.

## Identificação de microrganismos selecionados

Atualmente, a identificação de microrganismos segue um padrão mais completo de métodos de análises que permitem assegurar com maior precisão a identidade do organismo. O gene 16S rRNA, por exemplo, tem sido considerado o mais fiel para medir as relações evolucionárias de bactérias e de arqueias. Assim, ao classi-

ficar um novo táxon, é essencial descrever com precisão as informações fenotípicas, genotípicas e filogenéticas. Essas informações constituem o que se chama de abordagem polifásica da taxonomia, que envolve os seguintes métodos de análises: i) métodos fenotípicos (taxonomia numérica, composição de parede, análises de ácidos graxos, análises de proteínas, caracterização de colônias, estudos fisiológicos e bioquímicos); e ii) métodos genotípicos [16S rRNA, conteúdo de bases (%G + C), hibridização DNA-DNA, RFLP, ribotipagem e análises de genomas]. Os genes rRNA são os melhores alvos para os estudos filogenéticos, pois apresentam um mosaico de domínios variáveis e altamente conservados. O sequenciamento direto de genes que codificam para pequenas (16S rRNA) e grandes (23S rRNA) moléculas por PCR tem fornecido as bases da filogenia. Na prática, é muito difícil descrever uma espécie de procarioto sem sequenciar o gene 16S rRNA. A porcentagem de hibridização DNA-DNA é um parâmetro indireto da similaridade das sequências entre dois genomas, sendo um dos métodos primordiais para o delineamento de espécies. Por sua vez, as informações filogenéticas são obtidas a partir dos estudos das sequências dos genes 16S rRNA ou 23S rRNA no caso de bactérias e, 18S rRNA no caso de fungos. Já a quimiotaxonomia, por exemplo, é uma ferramenta essencial que vem sendo utilizada na classificação de bactérias. Está relacionada à distribuição de substâncias químicas específicas da célula, tais como aminoácidos, açúcares, lipídeos polares, menaquinonas, ácidos graxos etc. Para alguns gêneros de actinobactérias, por exemplo, a análise da composição de ácido micólico é especialmente necessária.

A composição em bases nucleotídicas, expressa pela porcentagem molar do conteúdo em guanina e citosina [%mol (G+C)], é uma das características requeridas para descrever espécies ou gêneros de microrganismos procarióticos. Quanto maior for o conteúdo em (G+C), maior a quantidade de energia térmica requerida para separar as duas cadeias de DNA. O conteúdo em %mol de (G+C) pode variar entre 24 e 86%, dependendo do grupo de microrganismos (Madigan et al., 2015). Normalmente, o conteúdo em %mol de (G+C) de estirpes que constituem uma espécie filogeneticamente coerente não difere mais de 3%, podendo apresentar maior variação entre diferentes espécies de um gênero.

Além desses métodos, tem-se introduzido na classificação de novas espécies a análise genômica, incluindo de multilocos. Entretanto, diversos comitês de taxonomia microbiana vêm recomendando a inclusão da análise genômica para classificação e caracterização de novos microrganismos, sendo essa estratégia nomeada taxono-genomics (Ramamamy et al., 2014). Os principais métodos que utilizam o genoma na afiliação taxonômica são a análise de multilocos, a análise comparativa entre os genomas totais, avaliando a frequência de tetra-nucleotídeos, e a identidade média dos nucleotídeos (*average nucleotide identity* – ANI) (Ramamamy et al., 2014).

## EXTREMÓFILOS COMO FONTE DE BIOPROSPECÇÃO

Certas características multifuncionais dos microrganismos extremófilos, comumente raras, tornam esses organismos excelentes fontes para descoberta de novos produtos com aplicações em diversas áreas, incluindo agricultura, meio ambiente, medicina, farmacologia e indústria. Extremófilos são microrganismos que habitam condições extremas do planeta, tais como pH (acidófilos, alcalinófilos), temperatura (psicrófilos, termófilos), radiação (tolerância à radiação), salinidade (halófilos), pressão (piezófilos). Microrganismos extremófilos benéficos são também utilizados na indústria de processamento de alimentos, já que produzem uma variedade de compostos bioativos, metabólitos secundários, vitaminas e corantes (Barcelos et al., 2020). Por exemplo, *Streptomyces thermonitrificans*, *Streptococcus* sp. NTU-130 e *Aspergillus fumigatus*, isolados de composto, foram utilizados na produção de biofertilizantes que contribuíram para aumento da qualidade do produto usado na agricultura (Chen et al., 2007). Nessa mesma linha de investigação, Chang e Yang (2009) reportaram o desenvolvimento de um biofertilizante à base de um consórcio de microrganismos termotolerantes envolvidos na solubilização de fosfato. Os microrganismos que compunham esse biofertilizante produziram diversas enzimas, incluindo lipase, celulase, amilase, quitinase, pectinase, protease e nitrogenase, que contribuíram para melhorar a qualidade do biofertilizante.

Há inúmeros relatos de aplicações desses organismos na agricultura, e um grupo de pesquisa da Embrapa vem, há anos, monitorando a biodiversidade de bactérias e fungos e prospectando novas espécies microbianas isoladas de ambientes extremos para aplicações biotecnológicas. Diversos trabalhos – possivelmente, as primeiras pesquisas no Brasil – envolvendo bactérias halófilas de manguezais foram realizados na Embrapa Meio Ambiente em conjunto com outras instituições, como USP, Unicamp, Cena/USP e Instituto Butantan, por meio do projeto temático financiado pela Fapesp para acessar a biodiversidade dos manguezais do estado de São Paulo. Florestas de mangue são ecossistemas tropicais e subtropicais situados em zonas costeiras e, portanto, ambientes salinos, onde plantas e microrganismos são tolerantes à alta salinidade. Alguns gêneros, como a *Avicenia*, excretam o excesso de sal via glândulas da folha (Figura 16.3).

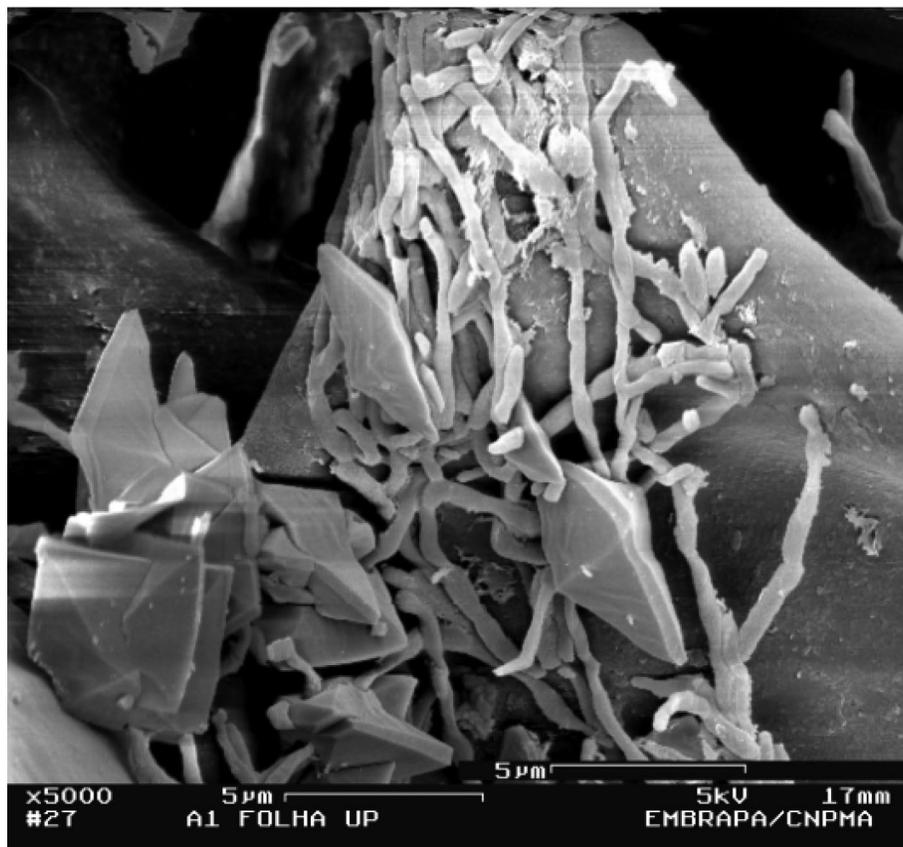


Figura 16.3. Eletromicrografia de varredura da superfície foliar do mangue *Avicennia* exsudando cristais de sais.

Novos gêneros/espécies de bactérias, incluindo cianobactérias de manguezais, que foram descritas nesse projeto contribuíram para os estudos da biodiversidade desse importante ecossistema. Entre os novos gêneros de cianobactérias descobertos estão *Phyllonema avicenniicola* gen. nov., sp. nov. e *Foliisarcina bertiogensis* gen. nov., sp. nov. (Alvarenga et al., 2016), além de uma nova espécie bacteriana, *Pseudomonas aestus* sp. nov. (Vasconcellos et al., 2017). Essa nova espécie bacteriana halotolerante, *Pseudomonas aestus* sp. nov., isolada de manguezais, mostrou-se potente solubilizadora de fosfato, capaz de promover o crescimento de plantas (Vasconcellos et al., 2017, 2021). Castro et al. (2018) isolaram 115 bactérias endofíticas associadas aos mangues, *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa* e *Avicennia nitida*, envolvidas na síntese de ácido

indol acético. Uma dessas linhagens, *Enterobacter* sp., MCR1.48, foi capaz de aumentar a biomassa da parte aérea da árvore *Acacia polyphylla* e efetivamente promover o crescimento. Aqui, percebe-se o grande potencial de microrganismos endofíticos de manguezais que podem ter aplicações na agricultura. Microrganismos endofíticos também podem ter outras aplicações industriais, por produzirem enzimas, proteínas, antibióticos, corantes e biosurfactantes. Foi com esse interesse que Castro et al. (2014) isolaram bactérias endofíticas das plantas, *Avicenia nitida* e *Rhizophora mangle*, capazes de produzir protease, endoglucanase, amilase e esterase. *Bacillus* compreendeu 42% de todas as bactérias isoladas, que, por sua vez, constituíram o gênero com maior potencial de produção de amilase, esterase e endoglucanase. O trabalho de Castro et al. (2014) vem contribuir para uma melhor compreensão da comunidade endofítica dos manguezais brasileiros, bem como para prospectar novas espécies com potencial biotecnológico.

Florestas de mangue são adaptadas a esse ambiente hostil e, provavelmente, isso limita o desenvolvimento de muitas espécies de plantas vasculares presentes no ambiente terrestre circunvizinho. Ademais, é possível que tanto manguezais como a microbiota associada atuem na inibição de muitos outros organismos, por produzirem substâncias bioativas.

Os microrganismos, assim como as plantas, também são capazes de sobreviver a várias condições de estresses abióticos, como estresses hídricos. Nesses casos, a tolerância deve-se à formação de biofilme, exopolissacarídeos, osmólitos intracelulares, entre outros (Chaves et al., 2002; Monier; Lindow, 2004). Os exopolissacarídeos (EPS) são produzidos por uma grande variedade de microrganismos, acumulando-se na superfície das células (Coronado et al., 1996), e seu uso vem sendo associado a um mecanismo de adaptação a uma grande variedade de condições estressantes ambientais, como solos salinos, variações de temperatura e estresse hídrico. A produção de EPS pelos microrganismos pode auxiliar na sobrevivência da planta a determinados tipos de estresse ambientais, quando inoculadas com microrganismos de interesse. Ashraf et al. (2004), ao inocular plântulas de trigo com bactérias capazes de produzir EPS, observaram uma redução na absorção de sódio, aliviando o estresse salino e, ainda, promovendo o crescimento da planta.

Há poucos estudos relacionando os microrganismos existentes em locais áridos e semiáridos, assim como microrganismos associados a plantas desses ambientes, mas vem crescendo o interesse por esse tema nos últimos anos. Nosso grupo de pesquisa vem desenvolvendo projetos voltados ao desenvolvimento de inoculantes bacterianos para uso agrícola, bem como a descoberta de substâncias bioativas a partir de microrganismos extremofílicos da Caatinga. Estresses abióticos, como as secas, normalmente são os principais fatores responsáveis por reduzir significativamente rendimentos de grandes culturas agrícolas no mundo. Uma estratégia bastante promissora, prática

e rápida para mitigação dos efeitos da seca é o uso de bactérias simbióticas ou fungos osmotolerantes obtidos de regiões áridas e semiáridas. Recentemente, nosso grupo isolou rizobactérias associadas a diversas cactáceas do bioma Caatinga, que apresentaram o diferencial de promover o crescimento de plantas de milho em condições de seca (Kavamura et al. 2013a). Em especial, uma bactéria, identificada como *Bacillus aryabhatai*, ainda foi capaz de promover o crescimento de outras plantas em déficit hídrico (Figura 16.4) e apresentar características interessantes para desenvolvimento de um bioproduto, dado o caráter de tolerância à seca e outras características igualmente importantes, como síntese de osmólitos compatíveis. Esforços também têm sido empregados por nossa equipe para compreender a dinâmica da comunidade microbiana em solo e rizosfera de mandacaru (*Cereus jamacaru*) (Kavamura et al., 2013b). Uma abordagem importante que pode suscitar a recuperação de áreas em processos de desertificação seria o replantio dessas áreas com plantas endêmicas tolerantes aos estresses abióticos, como as cactáceas, associadas a microrganismos osmotolerantes. Plantas assim inoculadas podem garantir maior índice de pegamento de mudas em solos degradados. Costa e Melo (2012) isolaram de palma (*Opuntia ficus-indica*) bactérias capazes de promover o crescimento de feijão-caupi. Essas bactérias, quando inoculadas em plantas de palma axênicas e plantadas em solos com baixa atividade de água, melhoraram o índice de pegamento das plântulas.

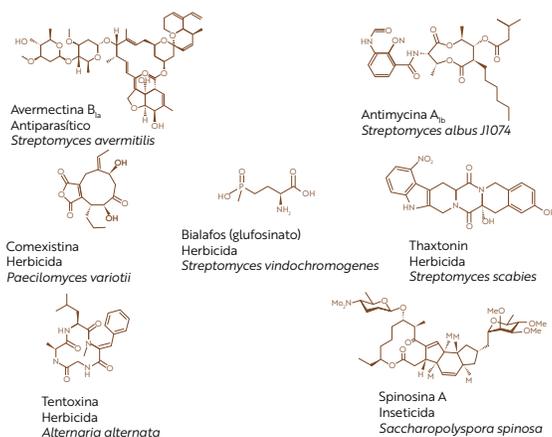
Foto: Tamar Melo



Figura 16.4. Plantas de soja inoculadas (à direita) com uma bactéria osmotolerante e não inoculadas (à esquerda), crescidas com reduzida atividade de água.

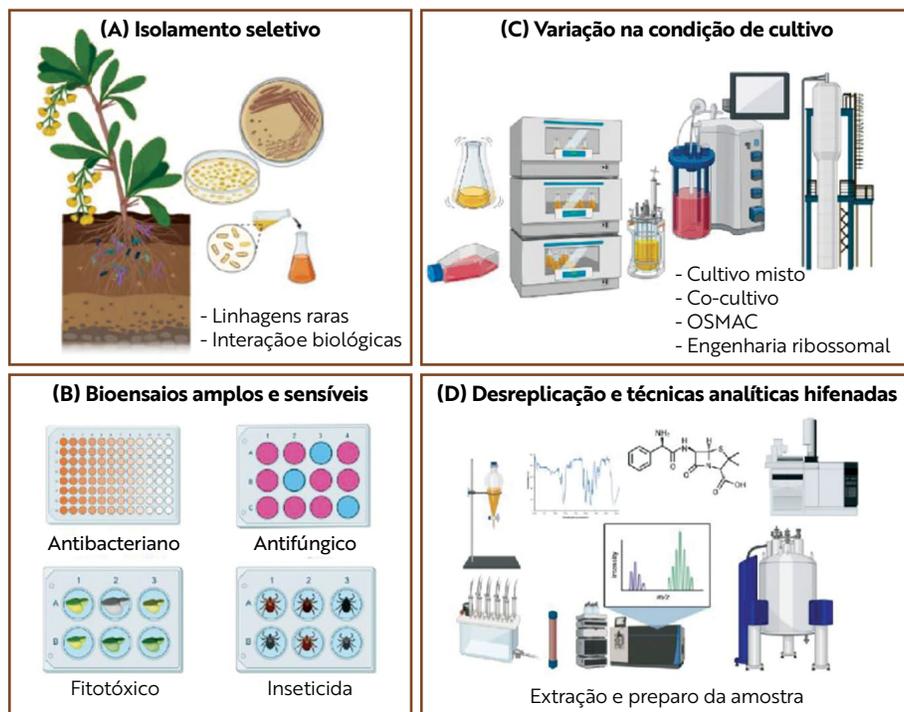
## BIOPROSPECÇÃO DE SUBSTÂNCIAS BIOATIVAS

Os microrganismos produzem valiosas substâncias químicas que são extensivamente utilizadas, há anos, na agricultura e na pecuária. A versatilidade metabólica desses organismos oferece oportunidade para prospecção de substâncias com atividade fungicida, bactericida, herbicida, inseticida, algicida, nematocida, antiparasitária e anti-oomiceto (Cantrell et al., 2012). Ainda mais importante, muitos desses metabólitos são responsáveis por novos mecanismos de ação, limitando questões de resistência aos químicos utilizados. Entre diversos exemplos de sucesso, destacam-se bialafos, avermectina e espinosina, produzidos por bactérias pertencentes aos gêneros *Streptomyces* e *Saccharopolyspora* (Yan et al., 2018). A Figura 16.5 ilustra as estruturas desses compostos. O bialafos, também conhecido como glufosinato, quando metabolizado pela planta, inibe a glutamina sintetase e tem sido empregado como um herbicida pós-emergência não seletivo, cuja ação biológica inspirou a síntese do glifosato (Saxena; Pandey, 2001). As espinosinas e suas modificações semissintéticas são os principais ingredientes ativos de muitos inseticidas comerciais, incluindo Spinosad e Spinetoram, que, efetivamente, podem eliminar pragas agrícolas por meio da hiperexcitação do sistema nervoso (Thompson et al., 2000). Por sua vez, na década de 1970, a avermectina revolucionou a área de medicina veterinária, graças a sua potente bioatividade contra ectoparasitas e endoparasitas (Jansson; Dybas, 1998). Desse modo, em 2015, o prêmio Nobel de Medicina foi entregue aos cientistas responsáveis pela descoberta desse importante antiparasítico (Callaway; Cyranoski, 2015).



**Figura 16.5.** Estruturas químicas de produtos naturais microbianos que são utilizados como pesticidas. As bioatividades e fontes produtoras estão destacadas nas respectivas figuras.

Apesar de diversas descobertas que resumem décadas de ouro na prospecção de metabólitos microbianos, um recente declínio na taxa de descoberta de novos produtos naturais tem sido reportado (Jones et al., 2017). Contudo, a grande diversidade química sintetizada por microrganismos inspira o contínuo desenvolvimento de produtos comerciais (Shen, 2015). Novas substâncias naturais são descobertas quando novas estratégias de seleção são apresentadas ou quando novas fontes de diversidade são examinadas em bioensaios existentes. Assim, é importante reforçar esses dois aspectos de novidades em programas de bioprospecção (Cragg; Newman, 2013). À luz do atual conhecimento, a estratégia de bioprospecção tem sido apoiada em quatro pilares: A) isolamento microbiano seletivo; B) ensaios biológicos amplos e sensíveis; C) maximização das condições de cultivo; e D) combinações de estratégias químicas para seleção de compostos. A Figura 16.6 ilustra as etapas de um programa de descoberta de produtos naturais microbianos para uso na agricultura.



**Figura 16.6.** Estratégia para contínua prospecção de metabólitos secundários microbianos. (A) Busca baseada em observações ecofisiológicas e grupos microbianos raros; (B) painel de células para bioensaios e triagem de alto desempenho; (C) maximização das condições de cultivo para ativar genes e ampliar a diversidade de compostos; (D) extração, preparo da amostra e técnicas analíticas hífenadas para desrepliação de extratos microbianos.

A avaliação dos recursos microbianos preservados em coleções de culturas é de suma importância para descoberta de potenciais bioatividades. Entretanto, os programas de descobertas baseados na busca de moléculas inéditas têm alcançado maior sucesso ao selecionar linhagens raras prospectadas de nichos auspiciosos e poucos explorados (Strobel et al., 2004). Tais trabalhos utilizam a estratégia baseada na busca por novos gêneros e espécies que, supostamente, evoluíram para sintetizar vias metabólicas únicas (Challinor; Bode, 2015). Salinosporamida, cianosporasida, halomadurones, nocardiamida, actinosporina e paulomicina são exemplos de moléculas inéditas identificadas em estudos de metabolômica de novas espécies microbianas (Subramani; Sipkema, 2019).

Novos produtos naturais foram identificados a partir de uma variedade de habitats, incluindo microbiomas relacionados às plantas, microbiomas de habitats extremos e aqueles associados aos animais marinhos (Souza, 2016; Cragg; Newman, 2013; Strobel et al., 2004). Esforços têm sido conduzidos na Embrapa Meio Ambiente, em Jaguariúna, SP, para isolar bactérias e fungos de habitats extremos; a exemplo do que fizeram Silva et al. (2018, 2020) e Melo et al. (2016) que isolaram e identificaram compostos bioativos de bactérias da rizosfera de uma das duas únicas plantas que sobrevivem na Antártica, *Deschampsia antarctica* (Figura 16.7).



Fonte: Itamar Melo

**Figura 16.7.** *Deschampsia antarctica*, gramínea endêmica da Península Antártica em pleno crescimento durante o verão; planta hospedeira de uma grande diversidade de actinobactérias de onde se isolaram substâncias anticancerígenas (Silva et al., 2020).

Além disso, fungos endofíticos, isolados do musgo *Schistidium antarctici*, encontrado na Antártica, produziram substâncias antioxidantes e antibacterianas, principalmente contra bactérias patogênicas aos humanos. Particularmente, *Mortierella alpina* produz, além desses compostos, ômega 3, tendo os ácidos linolênico e araquidônico como os principais ácidos graxos majoritários (Melo et al., 2014). Os fungos endofíticos têm atraído atenção nos últimos anos, mas pouquíssimos foram isolados de musgos. Em ecossistemas como a Antártica, a distribuição de microrganismos é direcionada à localização dos diferentes hospedeiros, como as aves, as populações de invertebrados e a vegetação, as quais são verdadeiras minas para a prospecção (Silva et al., 2018).

Microrganismos endofíticos, associados às plantas de ambientes extremos, são recursos valiosos para a descoberta de novas substâncias bioativas. Geralmente, esses organismos evoluíram no sentido de sintetizar novos compostos, normalmente raros, que asseguram a sobrevivência em condições extremas. Em regiões áridas do globo, microrganismos simbióticos exercem papel crucial na sobrevivência e na manutenção de plantas e animais. Visando prospectar fungos endofíticos de plantas medicinais de regiões semiáridas envolvidos na produção de substâncias anticancerígenas e antifúngicas, Santos et al. (2012) identificaram potentes fungos endofíticos da espécie medicinal, nativa da Caatinga, *Combretum leprosum*. Extratos puros do endófito *Aspergillus oryzae* CFE 108 exibiram forte atividade citotóxica contra sarcoma J775, leucemia, carcinoma ECV304 e câncer cervical. Nesse contexto, vale destacar que *C. leprosum* é uma planta muito utilizada na região como anti-inflamatório, sedativo, inseticida e herbicida. Esses resultados mostram a importância de prospectar novas substâncias bioativas a partir de endófitos associados às plantas medicinais.

A estratégia de maior sucesso para a prospecção de metabólitos está relacionada à seleção de microrganismos que vivem em associação biológica com seus hospedeiros. Muitos produtos naturais têm coevoluído com seus alvos moleculares, apresentando potentes bioatividade e seletividade, cujos produtores utilizam para restringir o crescimento de competidores (Yan et al., 2018). Nesse sentido, o efeito alelopático tem ganhado cada vez mais atenção para prospecção de metabólitos de interesse agrícola (Saxena; Pandey, 2001). A alelopatia tem sido definida como qualquer processo envolvendo metabólitos secundários produzidos por plantas, algas, bactérias e fungos que influenciam o crescimento e o desenvolvimento de sistemas biológicos e agrícolas (Khalid et al., 2002). Apoiados por tais conceito e estratégia, pesquisadores têm buscado desenvolver novos bio-herbicidas à base de aleloquímicos, produtos considerados de alto valor e que ainda não existem no mercado agrícola brasileiro. Assim, Souza et al. (2017) estudaram a diversidade de microrganismos associados às esponjas marinhas do arquipélago de São Pedro e São Paulo que culminaram no isolamento e identificação das substâncias, butenolida, dicetopiperazinas,

acremomidinas e acremoxantonas, que apresentaram atividade fitotóxica (Silva, 2015), anti-oomiceto (Souza, 2016) e antibacteriana (Martins et al., 2021). Similarmente, Hoyos (2018), ao investigar linhagens de Actinobacteria isoladas de ecossistemas de manguezais, Cerrado e Caatinga, detectou ação antagonica contra o patógeno de plantas *Sclerotinia sclerotiorum*, e os metabólitos majoritários foram identificados como pertencentes à família das bafilomicinas. Anteriormente, em estudos do mesmo grupo de pesquisa, Crevelin et al. (2013) reportaram pela primeira vez a fitotoxicidade de bafilomicinas produzidas por *Streptomyces* sp. contra a microalga *Chlorella vulgaris*.

Atualmente, além de avançar na busca por novas fontes de diversidade microbiana em nichos pouco explorados, as pesquisas voltadas à identificação de moléculas inéditas têm sido dirigidas para “despertar” genes silenciados no genoma. Dados do genoma de bactérias e fungos revelam que o potencial genético para sintetizar novos produtos naturais é imensurável (Baltz, 2019). Muitos genes e seus produtos, entretanto, permanecem silenciados no genoma em condições de cultivo, sem, portanto, serem explorados para a indústria agrícola. Algumas técnicas baseadas no cultivo microbiano têm sido implementadas, tais como cultivo misto, cocultivo, alterações nas condições físico-químicas de cultivo (uma linhagem muitos compostos, do inglês one strain many compounds – OSMAC) e introdução de mutações ribossomais em uma tentativa de expressar genes crípticos (Ochi, 2007; Romano et al., 2018; Liu; Kakeya, 2020). Com essa estratégia, novos compostos têm sido elucidados, e muitos deles se tornaram protótipos para o desenvolvimento de importantes fármacos (Liu et al., 2021).

Com relação às estratégias de seleção de compostos, a prospecção guiada pela bioatividade tem sido o método mais empregado. Embora essa abordagem tenha rendido a identificação de novas estruturas químicas, ela falha ao analisar apenas uma parte do potencial químico de um extrato biológico (Ito; Masubuchi, 2014). Para superar essa falha, pesquisadores têm utilizado um painel de células e bioensaios cada vez mais extensos. Como consequência, antibióticos pertencentes às mais diversas classes químicas têm sido descobertos (Subramani; Sipkema, 2019). Entretanto, essa técnica demanda muita mão de obra para realização dos bioensaios e processos de purificação e análise química. Com o auxílio de métodos combinados de análise química associados a um sistema robotizado, robusto e com alta sensibilidade, tal como a estratégia de triagem de alto desempenho (*high-throughput screening* – HTS), novas substâncias bioativas de interesse agrícola devem ser descobertas em um menor prazo. Também, inovações em estratégias de desreplicação de extratos microbianos e o uso de tecnologias analíticas emergentes podem eliminar a redescoberta de metabólitos já conhecidos, ampliando as possibilidades para a elucidação de moléculas inéditas (Ito; Masubuchi, 2014).

## BIOPROSPECÇÃO BASEADA NO GENOMA

Como mencionado anteriormente, a taxa de descoberta de novos produtos bioativos tem sofrido uma redução nas duas últimas décadas, sobretudo em função dos frequentes isolamentos dos mesmos compostos outrora já elucidados, bem como do isolamento das mesmas espécies/gêneros de microrganismos já identificadas. No entanto, com os avanços das pesquisas sobre sequenciamentos de genomas, os pesquisadores voltaram-se novamente às buscas de novos metabólitos secundários.

O genoma é o conjunto de genes de um organismo. Sua organização é diferenciada entre procariotos e eucariotos. Em procariotos, o genoma, na maioria das espécies, apresenta-se em forma circular (são poucos os procariotes que têm genoma linear), com apenas um cromossomo, e encontra-se livre no citoplasma. Já os eucariotos apresentam o genoma linear com múltiplos cromossomos envolvidos pela membrana nuclear formando o núcleo (Madigan et al., 2015). A bioprospecção baseada no genoma tem oferecido uma significativa contribuição à descoberta de novas substâncias bioativas. Essa prospecção, mais conhecida como mineração, envolve a identificação de clusters gênicos biossintéticos previamente não caracterizados no genoma daquele organismo sequenciado, análise das sequências de substâncias que codificam para esses clusters e identificação dos produtos dos clusters gênicos (Trivella; Felicio, 2018).

Para a análise inicial de um genoma, é necessário realizar sua extração e, em seguida, seu sequenciamento. As plataformas Illumina e Ion Torrent conseguem gerar milhares de dados de sequenciamento genético com tamanho de fragmentos geralmente menores que outros analisadores. As plataformas PacBio e MinION, por exemplo, são capazes de gerar dados de DNA em longos fragmentos (Madigan et al., 2015), situação que é ideal para análise de genomas, sobretudo para a estratégia de mineração de agrupamentos de genes biossintéticos.

Assim, à medida que os genomas de muitas espécies têm sido sequenciados, vêm aumentando as chances de descobrir novas substâncias bioativas de importância biotecnológica, pois se têm identificado novos clusters gênicos que codificam a biossíntese de produtos naturais. Os genomas microbianos contêm múltiplos clusters para a biossíntese de compostos raros, e a maioria dos genes permanecem silenciados, evitando, dessa maneira, que as respectivas substâncias sejam descobertas. Em geral, esses genes não são expressos em condições de laboratório. O sequenciamento do genoma de *Streptomyces coelicolor* A3(2) (Bentley et al., 2002), há duas décadas, por exemplo, revelou o grande potencial dessa espécie em sintetizar uma série de compostos ainda não detectados pelos métodos de cultivo tradicionais. Outra espécie que teve seu genoma sequenciado e que, a partir das análises, teve novos metabólitos secundários descobertos foi *S. avermetillis*. Demonstrou-se que essas duas espécies têm no mínimo 20 clusters gênicos biossintéticos cada uma, e a maioria deles não estão ligados

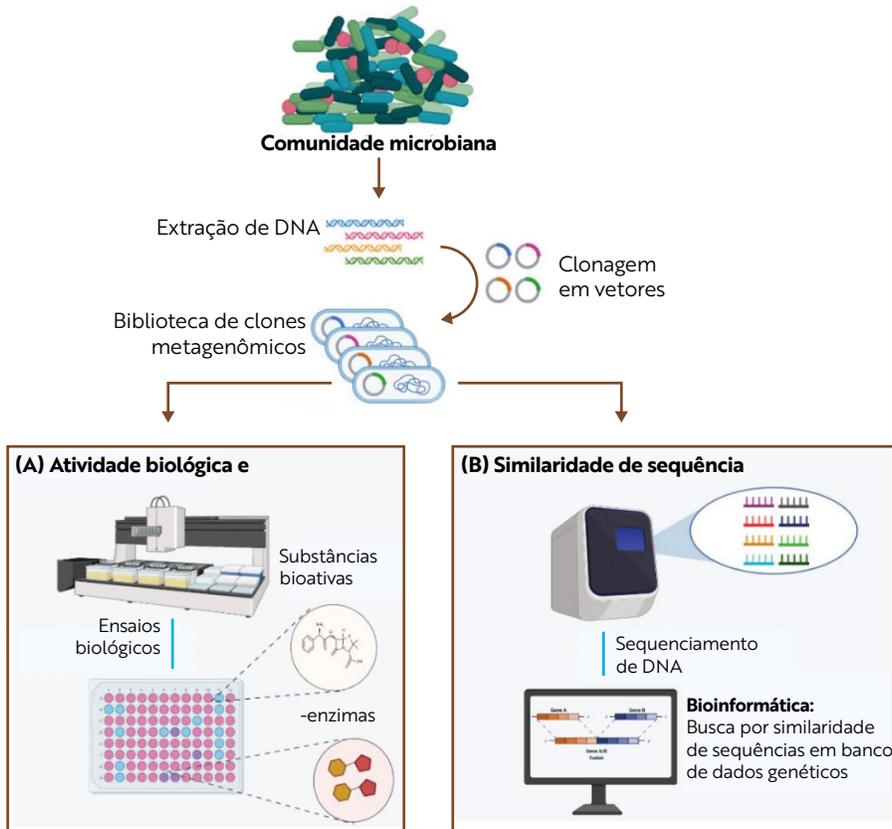
aos compostos outrora já descobertos nas últimas duas décadas. Exemplos de novos compostos bioativos acessados por abordagem genômica incluem estambomicina, produzida por *S. ambofaciens* com atividade citotóxica (Laureti et al., 2011); orfamida, um lipopeptídeo cíclico produzido por *Pseudomonas fluorescens* (Gross et al., 2007); o sideróforo coelichelina de *S. coelicolor* (Challis; Ravel, 2000); e o peptídeo catenulipeptina de *Catenulispora acidiphila* (Wang; van der Donk, 2012). A abordagem computacional para efetiva predição de agrupamentos gênicos e consequente expressão heteróloga tem provado ser uma técnica robusta para explorar novas substâncias químicas que são de grande interesse para a humanidade. Essas novas estruturas químicas têm o potencial de inspirar o contínuo desenvolvimento de novas drogas, por exemplo, em uma posterior estratégia química combinatória. Também, na era genômica, técnicas de biologia sintética, associadas às ferramentas de bioinformática e inteligência artificial, devem acelerar a anotação de genes, a predição da estrutura do produto natural e a descoberta de efetivas novas drogas para uso na agricultura (Prihoda et al., 2021).

## METAGENÔMICA FUNCIONAL COMO FONTE DE BIOPROSPECÇÃO

Os microrganismos isolados do solo pertencem, principalmente, aos filos Proteobacteria, Actinobacteria, Firmicutes e Bacteroidetes, visto que são grupos facilmente recuperados a partir de métodos tradicionais de cultivo. No entanto, uma imagem mais completa do mundo microbiano pôde ser obtida com o advento de ferramentas moleculares, revelando uma grande diversidade biológica ainda desconhecida e inexplorada (Handelsman et al., 2004). O acesso a essa maquinaria biossintética oculta abre possibilidade para novas descobertas e aplicações biotecnológicas. Nessa perspectiva, a metagenômica, ferramenta que permite a análise genômica das comunidades microbianas de determinado nicho ecológico sem necessidade de cultivar espécies individuais (Handelsman et al., 1998), surge como uma poderosa ferramenta de prospecção. Com essa técnica, é possível caracterizar comunidades bacterianas complexas em seus ambientes naturais, além de descobrir novos genes e compostos bioativos a partir da microbiota ainda não cultivável (Lacerda Júnior et al., 2017, 2019; Ofaim et al., 2017; Prayogo, et al., 2020).

A metagenômica funcional envolve isolamento do DNA de uma amostra ambiental, construção da biblioteca de clones (fragmentos de DNA recombinante) e triagem para determinada função de interesse por meio da expressão heteróloga por hospedeiro de fácil cultivo (Figura 16.8). Em geral, a triagem de bibliotecas metagenômicas baseia-se na atividade biológica (abordagem orientada por função) ou na sequência de nucleotídeos (abordagem orientada por sequência de DNA). Na triagem baseada na função, os clones metagenômicos são cultivados em meios suplementados com

substratos específicos e corantes (cromóforos) indicadores, sendo a conversão catalítica revelada pela formação de um halo claro ou colorido em torno da colônia. Vários parâmetros são importantes para uma triagem bem-sucedida, como a abundância do gene na biblioteca, o tamanho médio dos insertos, o uso de organismo hospedeiro capaz de expressar o gene-alvo e o método de ensaio (Ngara; Zhang, 2018).



**Figura 16.8.** Etapas envolvidas na montagem de bibliotecas metagenômicas e estratégias de triagem de compostos bioativos baseadas na (A) atividade biológica e (B) na similaridade de sequência do inserto de DNA.

Ao empregar o método mais adequado ou a combinação de vários métodos, é possível acessar o rico e diverso reservatório genético inexplorado das comunidades microbianas, sem necessidade de cultivar espécies individuais. O uso dessa abordagem genética já levou à identificação de novas enzimas e substâncias bioativas com

potencial de uso em diversos setores industriais (Prayogo, et al., 2020). Na agricultura, o emprego dessa tecnologia pode desempenhar um importante papel na busca de novos agroquímicos naturais de origem microbiana, como alternativas aos produtos químicos sintéticos. Por exemplo, substâncias naturais com atividade antifúngica derivadas do metabolismo de microrganismos ainda não cultivados podem apresentar diferentes modos de ação bioquímica, burlando mecanismos de resistência dos patógenos aos fungicidas sintéticos (Santana-Pereira et al., 2020).

As bibliotecas metagenômicas construídas a partir de DNA isolado do solo podem armazenar um grande repertório de clusters gênicos biossintéticos originados da fração não cultivada de microrganismos, que codificam compostos naturais com novos mecanismos de ação antagonistas contra fitopatógenos (Santana-Pereira et al., 2020). Um clone metagenômico oriundo do solo de floresta foi detectado por meio da produção de um composto antifúngico da classe dos policetídeos. Embora a substância não tenha sido identificada, a caracterização molecular revelou a presença de um novo agrupamento gênico (Chung et al., 2008). Um peptídeo antifúngico, MMGP1, com propriedade de penetração direta na célula, foi recentemente identificado em metagenoma marinho. O peptídeo apresentou atividade proteolítica *in vitro*, que pode estar associada a sua atividade antifúngica. O peptídeo não mostrou similaridade com nenhuma sequência de peptídeo antimicrobiano existente no banco de dados (Pushpanathan et al., 2013).

Nesse mesmo contexto, a busca por quitinases a partir de bibliotecas metagenômicas vem ganhando destaque no controle de pragas agrícolas, apresentando tanto atividade inseticida como fungicida (Berini et al., 2019). Essas enzimas podem ser utilizadas individualmente, bem como em combinação com pesticidas químicos ou outros biopesticidas, reduzindo o impacto ambiental e/ou aumentando sua eficácia. Duas quitinases de origem metagenômica recentemente descobertas (Chi8H8 e 53D1) afetam, *in vitro*, a estrutura de *Bombyx mori*, inseto-modelo entre os lepidópteros. Entretanto, apenas 53D1 afetou o crescimento e o desenvolvimento da larva com administração oral, induzindo mortalidade e redução de peso das pupas. Os resultados *in vivo* demonstram um potencial promissor da quitinase 53D1 como proteína inseticida. Por outro lado, a Chi8H8, encontrada em metagenoma de um solo supressivo, também apresentou atividade antifúngica contra os fungos fitopatogênicos *Fusarium graminearum* e *Rhizoctonia solani* (Hjort et al., 2014; Berini et al., 2017).

A toxoflavina, uma fitotoxina sintetizada por patógenos bacterianos como *Burkholderia glumae* e *Burkholderia gladioli*, é um dos principais fatores de virulência associado a doenças no arroz, responsável por graves perdas em plantações ao redor do mundo (Nandakumar et al., 2009; Ham et al., 2011). Atualmente, nenhuma variedade com resistência completa à mancha bacteriana está disponível, e o surgimento de cepas bacterianas resistentes ao ácido oxolínico, principal método de controle, alerta para a

necessidade de novos tratamentos. Uma nova enzima, TxeA, descoberta por meio do *screening* de bibliotecas metagenômicas, é capaz de degradar a toxoflavina, atuando como uma estratégia de antivirulência no controle de doenças causadas pela toxina (Choi et al., 2018).

Além da degradação de fitotoxinas bacterianas, enzimas derivadas de bibliotecas metagenômicas também podem ser utilizadas no processo de biorremediação de compostos xenobióticos. Recentemente, uma nova dioxigenase foi minerada a partir do metagenoma de solo agrícola contaminado, com potencial para degradação de pesticidas (Sharma et al., 2020). A atividade catalítica dessas enzimas pode ser utilizada como estratégia de biorremediação em ambientes contaminados com pesticidas químicos amplamente utilizados na agricultura, que apresentam ampla toxicidade e acúmulo nos ecossistemas (Kumar et al., 2019).

O fósforo (P) é um dos macronutrientes essenciais para o crescimento e desenvolvimento vegetal. Entretanto, o fitato (PA), maior forma de P no solo, não é facilmente absorvido pelas raízes das plantas. Assim, as fitases, enzimas produzidas por uma gama de microrganismos do solo, decompõem o fitato, disponibilizando Pi assimilável. Diante do cenário de esgotamento de P, as fitases destacam-se como ferramentas poderosas para nutrição vegetal e aumento da produtividade agrícola. As fitases comerciais, com poucas exceções, são derivadas de microrganismos cultivados (Haefner et al., 2005). Na maioria dos casos, fitases fúngicas ou bacterianas podem ser aplicadas diretamente como fator de crescimento ou superexpressas em plantas transgênicas (Idriss et al., 2002; Bilyeu et al., 2008; Belgaroui et al., 2014). Do ponto de vista industrial e ambiental, a busca por fitases produzidas pela fração não cultivada de microrganismos por meio de técnicas independentes de cultivo (isto é, triagem de bibliotecas metagenômicas) apresenta grande potencial para descoberta de novas enzimas com características vantajosas. Embora ainda pouco explorado, o rastreamento de bibliotecas metagenômicas tem permitido a descoberta de novas fitases ocultas na fração não cultivada do solo. Algumas delas são novos tipos ou subtipos de fitases, apresentando domínios catalíticos nunca descritos (Castillo Villamizar et al., 2019) e alta resistência a amplas faixas de temperaturas (Tan et al., 2016). Essas descobertas podem ajudar na aplicação de biocatalisadores mais eficientes, com potencial na resolução de problemas futuros relacionados com a escassez de P na agricultura.

## COLEÇÕES DE MICRORGANISMOS COMO FONTE PARA BIOPROSPECÇÃO

Coleções de microrganismos, ou bancos de recursos microbianos, são repositórios da biodiversidade mantidos *ex situ* em diferentes métodos de conservação de longo

prazo, a fim de assegurar a viabilidade e a estabilidade genética de microrganismos, garantindo material biológico de alta qualidade para uso em pesquisa e ensino, além de viabilizar o uso sustentável dos recursos microbianos, os quais são de extrema importância para o desenvolvimento econômico.

As coleções atuam como um backup de parte da diversidade de alguns habitats/*hotspots* da biosfera, sendo responsável pela preservação da diversidade genética. Tem papel preponderante na distribuição de linhagens-tipo (linhagens de referência), na manutenção de estudos taxonômicos e na descoberta de novas substâncias de importância farmacêutica, agrícola e industrial por meio da prospecção de linhagens superiores.

Muitas coleções têm em seus acervos grande parte da diversidade microbiana de alguns ambientes e guardam verdadeiros tesouros na forma de bioprodutos e/ou de novas substâncias bioativas. Por exemplo, a Coleção de Microrganismos de Importância Agrícola e Ambiental (CMAA), da Embrapa Meio Ambiente, conta com um acervo de fungos, arqueias e bactérias, incluindo cianobactérias e actinobactérias de diversos ecossistemas brasileiros e da Antártica, possibilitando a bioprospecção de microrganismos de ambientes de difícil acesso e que exigiriam grandes esforços de amostragem.

Algumas coleções geralmente têm a função principal de conservação de organismos específicos, como fungos entomopatogênicos, bactérias patogênicas aos humanos, leveduras para indústria de vinhos, cianobactérias e arqueias. Outras são consideradas coleções temáticas, sendo especializadas em organismos de determinados habitats/ecossistemas, a exemplo das coleções de microrganismos termofílicos, psicofílicos, halofílicos ou daquelas que mantêm grupos particulares de microrganismos envolvidos na biorremediação de poluentes ou produtores de enzimas. Há coleções que estudam gêneros/espécies específicas e, portanto, preservam espécies de interesse para a agroindústria, como é o caso da coleção de *Bradhyrhizobium* sp., da Embrapa Soja, e da coleção de *Bacillus thuringiensis*, da Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia.

Muitos agentes de biocontrole e biofertilizantes, bem como substâncias bioativas, foram descobertos por meio da exploração em coleções de microrganismos. Estudos relatam a importância das coleções tanto para a manutenção da biodiversidade quanto para a promoção do desenvolvimento científico e tecnológico. Díaz-Rodríguez et al. (2021) descrevem o papel das coleções microbianas para garantir a segurança alimentar mundial por meio do desenvolvimento biotecnológico do setor agrícola. A exploração de microrganismos mantidos nas coleções de cultura é crucial para o desenvolvimento de tecnologias que levam ao aumento da produtividade, como melhora na fertilidade do solo, promoção de crescimento de plantas e controle biológico de pragas, além de contribuir para a redução de impactos, tornando as práticas agrícolas

mais sustentáveis (May et al., 2021; Murad et al., 2006; Hou; Johnston, 1992). Do mesmo modo, a diversidade microbiana assegurada nas coleções pode levar à descoberta de moléculas com atividades antimicrobianas, antioxidantes e antitumorais de interesse médico e farmacêutico (Andrade et al., 2018; Thomas et al., 2011). Um *screening* realizado a partir de 72 isolados provenientes da CMAA, da Embrapa Meio Ambiente, coletados na Antártica, identificou ao menos três cepas com atividade antitumoral (Silva et al., 2020). Similarmente, no Brasil, muitos estudos obtiveram sucesso ao prospectar valiosas moléculas para aplicação em diversos setores da indústria. Por exemplo, enzimas lignocelulolíticas, em especial aquelas que suportam atividade em altas temperaturas e em condições ácidas, foram descobertas após estratégias de *screening* de microrganismos depositados nas coleções de culturas mantidas por universidades e centros de pesquisa (Valencia; Chamberg, 2013). Essas enzimas alavancaram o setor de biocombustíveis, sobretudo a indústria do etanol de segunda geração, e têm o potencial para serem exploradas em plataformas de biorrefinaria. Além disso, universidades e centros nacionais de pesquisa exercem papel fundamental no processo de coleta e preservação do patrimônio genético brasileiro, em que microrganismos podem ser explorados para solucionar questões ambientais, agrícolas e de saúde animal e humana.

Em um cenário ideal, além da preservação de células microbianas vivas, as coleções poderiam preservar o DNA genômico e o extrato bruto contendo os metabólitos secundários. Sabe-se que a extração de DNA genômico é uma rotina em coleções de microrganismos, em virtude da identificação molecular de linhagens de referência. Também, é de amplo conhecimento que os custos para obter genomas completos se tornaram financeiramente mais acessíveis e que ferramentas de bioinformática podem ser aplicadas para acelerar a descoberta de valiosas substâncias químicas. Igualmente, com o advento de tecnologias robotizadas e *screening* de alto desempenho, as bibliotecas de extratos microbianos potencializam as possibilidades de descobertas, perfazendo testes biológicos em um método mais rápido e eficaz.

O amplo acervo de bactérias mantido na CMAA tem sido objeto de estudo para aqueles interessados em buscar linhagens antagonistas, produtoras de substâncias bioativas, capazes de controlar pragas e doenças de plantas cultivadas ou promover seu crescimento. Assim, Vasconcellos et al. (2017, 2021) encontraram uma nova bactéria halotolerante, descrita como *Pseudomonas aestus*, capaz de solubilizar fosfato e promover o crescimento de plantas. Também, após procedimentos de *screening* e isolamento bioguiado, uma linhagem de actinobactéria mostrou potente bioatividade contra *Xanthomonas citri* subsp. *citri*, o agente causal do cancro cítrico, sendo que a atividade antimicrobiana foi determinada para o antibiótico lisolipina (Rodrigues et al., 2018). Nesse contexto, portanto, as coleções de culturas podem e devem ser exploradas como fontes de bioprospecção microbiana na busca por linhagens potencialmente

úteis aos diversos setores econômicos e industriais, uma vez que têm acervos de alto valor e potencial biotecnológico muitas vezes ainda inexplorado.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A agricultura tem se desenvolvido de modo que, atualmente, representa um dos principais pilares da economia brasileira, tendo experimentado uma tremenda revolução nas práticas de manejo do solo e de pragas, a fim de torná-la menos dependente de agrotóxicos e de fertilizantes químicos. Nesse sentido, o futuro da agricultura, sem dúvida, deverá priorizar o uso de insumos biológicos, principalmente aqueles envolvidos na promoção do crescimento de plantas e, conseqüentemente, no aumento de produtividade, bem como novos biopesticidas multifuncionais.

Considerando que o planeta Terra conta com aproximadamente 1 trilhão de microrganismos e que cerca de 99,99% ainda não foram descritos, percebe-se, então, que há muito a ser descoberto. Daí a busca por novos organismos funcionais para uso na agricultura. Esse tesouro microbiano produz, potencialmente, uma infinidade de substâncias naturais que podem ser diretamente aplicadas para auxiliar em programas de controle integrado de pragas. No entanto, apenas uma pequena fração cultivável é avaliada e, dessa fração, valiosos metabólitos ainda deixam de ser analisados, tais como os compostos orgânicos voláteis que têm sido ignorados em muitos estudos. Por questões de segurança, visando reduzir o uso intensivo de agroquímicos sintéticos, há uma urgente necessidade de novos produtos naturais com novos mecanismos de ação e acompanhados por esforços em reduzir os custos de sua produção. Portanto, as estratégias de bioprospecção voltadas à exploração da biodiversidade encontrada em diferentes habitats e a busca por moléculas inéditas são importantes para suprir a necessidade de um mercado de bioinsumos que está cada vez mais crescente e exigente.

Ademais, em razão da ação antrópica e dos desafios de cenários futuros de escassez hídrica e aumento da temperatura global, as pesquisas devem ser dirigidas à bioprospecção de microrganismos em ambientes ainda inexplorados, visando tolerância aos estresses abióticos, como secas, salinidade e temperaturas, como também a busca por biomoléculas com novos mecanismos de ação. Uma interessante estratégia para incrementar a eficiência de um agente de biocontrole é proceder ao manejo das condições ambientais no sentido de favorecer o antagonista. A adição de nutrientes, por exemplo, pode melhorar a capacidade de multiplicação de propágulos e de colonizar a rizosfera ou filosfera. Sabe-se, pois, que uma estratégia de bioprospecção malfeita leva, quase sempre, ao insucesso comercial. Portanto, é imprescindível que a exploração da biodiversidade nacional seja acompanhada das necessidades da indústria, para salvaguardar o enorme potencial da bioeconomia, visando à sustentabilidade dos agroecossistemas.

## REFERÊNCIAS

- AINSWORTH, T. D.; THURBER, R. V.; GATES, R. D. The future of coral reefs: a microbial perspective. *Trends in Ecology and Evolution*, v. 25, n. 4, p. 233-240, 2010.
- ALVARENGA, D. O.; RIGONATO, J.; BRANCO, L. H. Z.; MELO, I. S.; FIORE, M. F. *Phyllonema aviceniicola* gen. nov., sp. nov. and *Foliisarcina bertioagensis* gen. nov., sp. nov., epiphyllitic cyanobacteria associated with *Avicennia schaueriana* leaves. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, v. 66, p. 689-700, 2016.
- ALAIN, K.; QUERELLOU, J. Cultivating the uncultured: limits, advances and future challenges. *Extremophiles*, v. 13, n. 4, p. 583-594, 2009.
- ANDRADE, H. F.; ARAÚJO, L. C. A.; SANTOS, B. S.; PAIVA, P. M.; NAPOLEÃO, T. H.; CORREIA, M. T. S.; OLIVEIRA, M. B. M.; LIMA, G. M. S.; XIMENES, R. M.; SILVA, T.D.; SILVA, G. R.; SILVA, M. V. Screening of endophytic fungi stored in a culture collection for taxol production. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 49, supl. 1, p. 59-63, 2018.
- ASHRAF, M.; HASNAIN, S.; BERGE, O.; MAHMOOD, T. Inoculating wheat seedlings with exopolysaccharide-producing bacteria restricts sodium uptake and stimulates plant growth under salt stress. *Biology and Fertility of Soils*, v. 40, p. 157-162, 2004.
- AZEVEDO, J. L.; MACCHERONI, J. W.; PEREIRA, J. O.; ARAUJO, W. L. Endophytic microorganisms: a review on insect control and recent advances in tropical plants. *Electronic Journal of Biotechnology*, v. 3, n. 1, p. 40-65, 2000.
- BAIS, H. P.; WEIR, T. L.; PERRY, L. G.; GILROY, S.; VIVANCO, J. M. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annual Review of Plant Biology*, v. 57, p. 233-266, 2006.
- BALTZ, R. H. Natural product drug discovery in the genomic era: realities, conjectures, misconceptions, and opportunities. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, v. 46, n. 3-4, p. 281-299, 2019.
- BARCELOS, M. C.; RAMOS, C. L.; KUDDUS, M.; RODRIGUEZ-COUTO, S.; SRIVASTAVA, N.; RAMTEKE, P. W.; MISHRA, P. K.; MOLINA, G. Enzymatic potential for the valorization of agro-industrial by-products. *Biotechnology Letters*, v. 42, p. 1799-1827, 2020.
- BELGAROU, N.; ZAIDI, I.; FARHAT, A.; CHOUAYEKH, H.; BOUAIN, N.; CHAY, S.; CURIE, C.; MARI, S.; MASMOUDI, K.; DAVIDIAN, J. -C.; BERTHOMIEU, P.; ROUACHED, H.; HANIN, M. Over-expression of the bacterial phytase US417 in *Arabidopsis* reduces the concentration of phytic acid and reveals its involvement in the regulation of sulfate and phosphate homeostasis and signaling. *Plant & Cell Physiology*, v. 55, p. 1912-1924, 2014.
- BENTLEY, S. D.; CHATER, K. F.; CERDEÑO-TÁRRAGA, A. -M.; CHALLIS, G. L.; THOMSON, N. R.; JAMES, K. D.; HARRIS, D. E.; QUAIL, M. A.; KIESER, H.; HARPER, D.; BATEMAN, A.; BROWN, S.; CHANDRA, G.; CHEN, C. W.; COLLINS, M.; CRONIN, A.; FRASER, A.; GOBLE, A.; HIDALGO, J.; HORNSBY, T.; HOWARTH, S.; HUANG, C. -H.; KIESER, T.; LARKE, L.; MURPHY, L.; OLIVER, K.; O'NEIL, S.; RABBINOWITSCH, E.; RAJANDREAM, M. -A.; RUTHERFORD, K.; RUTTER, S.; SEEGER, K.; SAUNDERS, D.; SHARP, S.; SQUARES, R.; TAYLOR, K.; WARREN, T.; WIETZORREK, A.; WOODWARD,

- J.; BARREL, B. G.; PARKHILL, J.; HOPWOOD, D. A. Complete genome sequence of the model actinomycete *Streptomyces coelicolor* A3(2). **Nature**, V. 417, p. 141-147, 2002.
- BERINI, F.; CASARTELLI, M.; MONTALI, A.; REGUZZONI, M.; TETTAMANTI, G.; MARINELLI, F. Metagenome-sourced microbial chitinases as potential insecticide proteins. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, article 1358, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2019.01358>.
- BERINI, F.; PRESTI, I.; BELTRAMETTI, F.; PEDROLI, M.; VÅRUM, K. M.; POLLEGIONI, L.; SJÖLING, S.; MARINELLI, F. Production and characterization of a novel antifungal chitinase identified by functional screening of a suppressive-soil metagenome. **Microbial Cell Factories**, v. 16, article 16, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1186/s12934-017-0634-8>.
- BILYEU, K. D.; ZENG, P.; COELLO, P.; ZHANG, Z. J.; KRISHNAN, H. B.; BAILEY, A.; BEUSELINCK, P. R.; POLACCO, J. C. Quantitative conversion of phytate to inorganic phosphorus in soybean seeds expressing a bacterial phytase. **Plant Physiology**, v. 146, p. 468-477, 2008.
- BO BO, A.; KHAITOV, B.; UMURZOKOV, M.; MIN CHO, K.; WOONG, K. P.; CHOI, J. S. Biological control using plant pathogens in weed management. **Weed & Turfgrass Science**, v. 9, p. 11-19, 2020.
- BRINGEL, F.; COUÉE, I. Pivotal roles of phyllosphere microorganisms at the interface between plant functioning and atmospheric trace gas dynamics. **Frontiers in Microbiology**, v. 6, article 486, p. 1-14, May 2015.
- CALLAWAY, E.; CYRANOSKI, D. Anti-parasite drugs sweep Nobel prize in medicine 2015. **Nature**, v. 526, p. 174-175, 2015.
- CANTRELL, C. L.; DAYAN, F. E.; DUKE, S. O. Natural products as sources for new pesticides. **Journal of Natural Products**, v. 75, n. 6, p. 1231-1242, 2012.
- CARROL, M.; ZHOU, X. Panacea in progress: CRISPR and the future of its biological research introduction. **Microbiological Research**, v. 201, p. 63-74, 2017.
- CASTILLO VILLAMIZAR, G. A.; NACKE, H.; BOEHNING, M.; HERZ, K.; DANIEL, R. Functional metagenomics reveals an overlooked diversity and novel features of soil-derived bacterial phosphatases and phytases. **mBio**, v. 10, n. 1, e01966-18, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.1128/mBio.01966-18>.
- CASTRO, R. A.; DOURADO, M. N.; ALMEIDA, J. R.; LACAVA, P. T.; NAVE, A.; MELO, I. S.; AZEVEDO, J. L.; QUECINE, M. C. Mangrove endophyte promotes reforestation tree (*Acacia polyphylla*) growth. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 49, n. 1, p. 59-66, 2018.
- CASTRO, R. A.; QUECINE, M. C.; LACAVA, P. T.; BATISTA, B. D.; LUVIZOTTO, D. M.; MARCON, J.; FERREIRA, A.; MELO, I. S.; AZEVEDO, J. L. Isolation and enzyme bioprospection of endophytic bacteria associated with plants of Brazilian mangrove ecosystem. **SpringerPlus**, v. 3, p. 382, 2014.
- CHALLINOR, V. L.; BODE, H. B. Bioactive natural products from novel microbial sources. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1354, n. 1, p. 82-97, 2015.
- CHALLIS, G. L.; RAVEL, J. Coelichelin, a new peptide siderophore encoded by the *Streptomyces coelicolor* genome: structure prediction from the sequence of its non-ribosomal peptide synthetase. **FEMS Microbiology Letters**, v. 187, n. 2, p. 111-114, 2000.

- CHANG, C. H.; YANG, S. S. Thermo-tolerant phosphate-solubilizing microbes for multi- functional biofertilizer preparation. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 4, p. 1648-1658, 2009.
- CHAVES, M. M.; PEREIRA, J. S.; MAROCO, J.; RODRIGUES, M. L.; RICARDO, C. P. P.; OSÓRIO, M. L.; CARVALHO, I.; FARIA, T.; PINHEIRO, C. How plants cope with water stress in the field. Photosynthesis and Growth. **Annals of Botany**, v. 89, p. 907-916, 2002.
- CHEN, K. -S.; LIN, Y. -S.; YANG, S.-S. Application of thermotolerant microorganisms for biofertilizer preparation. **Journal of Microbiology, Immunology, and Infection**, v. 40, p. 462-473, 2007.
- CHOI, J. E.; NGUYEN, C. M.; LEE, B.; PARK, J. H.; OH, J. Y.; CHOI, J. S.; KIM, J. C.; SONG, J. K. Isolation and characterization of a novel metagenomic enzyme capable of degrading bacterial phytotoxin toxoflavin. **PLoS One**, v. 13, n. 1, e0183893, 2018.
- CHUNG, E. J.; LIM, H. K.; KIM, J. C.; CHOI, G. J.; PARK, E. J.; LEE, M. H.; CHUNG, Y. R.; LEE, S. W. Forest soil metagenome gene cluster involved in antifungal activity expression in *Escherichia coli*. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 74, n. 3, p. 723-30, 2008.
- CORONADO, C.; SÁNCHEZ-ANDDÚJAR, B.; PALOMARES, A. J. *Rhizobium* extracellular structures in the symbiosis. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 12, p. 127-136, 1996.
- CORREIA, N. M.; KRONKA JR., B. Controle químico de plantas dos gêneros *Ipomoea* e *Merremia* em cana-soca. **Planta Daninha**, v. 28, p.1143-1152, 2010.
- CORTES, M. V. C. B.; OLIVEIRA, M. I. DE S.; MATEUS, J. R.; SELDIN, L.; SILVA-LOBO, V. L.; FREIRE, D. M. G. A pipeline for the genetic improvement of a biological control agent enhances its potential for controlling soil-borne plant pathogens. **Biological Control**, v. 152, 104460, 2021.
- COSTA, F. E. C.; MELO, I. S. Endophytic and rhizospheric bacteria from *Opuntia ficus-indica* mill and their ability to promote plant growth in cowpea, *Vigna unguiculata* (L.) Walp. **African Journal of Microbiology Research**, v. 6, p. 1345-1353, 2012.
- CRAGG, G. M.; NEWMAN, D. J. Natural products: a continuing source of novel drug leads. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects**, v. 1830, n. 6, p. 3670-3695, 2013.
- CREVELIN, E. J.; CANOVA, S. P.; MELO, I. S.; ZUCCHI, T. D.; DA SILVA, R. E.; MORAES, L. A. B. Isolation and characterization of phytotoxic compounds produced by *Streptomyces* sp. AMC 23 from red mangrove (*Rhizophora mangle*). **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 171, n. 7, p. 1602-1616, 2013.
- DAUB, M. E. Cercosporin, a photosensitized toxin from *Cercospora* species. **Phytopathology**, v.72, n.4, p. 369-371, 1982.
- DÍAZ-RODRÍGUEZ, A. M.; GASTELUM, L. A. S.; PABLOS, C. M. F.; PARRA-COTA, F. I.; SANTOYO, G.; PUENTE, M. L.; BHATTACHARYA, D.; MUKHERJEE, J.; SANTOS-VILLALOBOS, S. The current and future role of microbial culture collections in food security worldwide. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, 291, 2021.
- GROSS, H.; STOCKWELL, V. O.; HENKELS, M. D.; NOWAK-THOMPSON, B.; LOPER, J. E.; GERWICK, W. H. The genomisotopic approach: a systematic method to isolate products of orphan biosynthetic gene clusters. **Chemistry & Biology**, v. 14, p. 53-63, 2007. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.chembiol.2006.11.007>.

HAEFNER, S.; KNIETSCH, A.; SCHOLTEN, E.; BRAUN, J.; LOHSCHIEDT, M.; ZELDER, O. Biotechnological production and applications of phytases. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 68, p. 588-597, 2005.

HALLMANN, J.; QUADT-HALLMANN, A.; MAHAFFEE, W. F.; KLOEPPER, J. W. Bacterial endophytes in agricultural crops. *Canadian Journal of Microbiology*, v. 43, p. 895-914, 1997.

HAM, J. H.; MELANSON, R. A.; RUSH, M. C. *Burkholderia glumae*: next major pathogen of rice? *Molecular Plant Pathology*, v. 12, p. 329-339, 2011.

HANDELSMAN, J. Metagenomics: application of genomics to uncultured microorganisms. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, v. 68, n. 4, p. 669-685, 2004.

HANDELSMAN, J.; M. R. RONDON, S. F. BRADY, J. CLARDY, AND R. M. GOODMAN. Molecular biological access to the chemistry of unknown soil microbes: a new frontier for natural products. *Chemistry & Biology*, v. 5, p. R245-R249, 1998.

HILTNER, L. Über neuere Erfahrungen und Probleme auf dem Gebiet der Bodenbakteriologie und unter besonderer Berücksichtigung der Grundungung und Brache. *Arbeiten der Deutschen Landwirtschaftlichen Gesellschaft*, v. 98, p. 59-78, 1904.

HJORT, K.; PRESTI, I.; ELVÄNG, A.; MARINELLI, F.; SJÖLING, S. Bacterial chitinase with phytopathogen control capacity from suppressive soil revealed by functional metagenomics. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 98, p. 2819-2828, 2014.

HOU, C.T.; JOHNSTON, T. M. Screening of lipase activities with cultures from the agricultural research service culture collection. *Journal of American Oil Chemists' Society*, v. 69, p. 1088-1097, 1992.

HOYOS, H. A. V. *Actinobactérias de biomas brasileiros: biodiversidade e potencial de uso na agricultura*. 2018. 130 f. Tese (Doutorado em Ciências (Microbiologia Agrícola) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

HYDE, K. D. The amazing potential of fungi: 50 ways we can exploit fungi industrially. *Fungal Diversity*, v. 97, p. 1-136, 2019.

IDRISS, E. E.; MAKAREWICZ, O.; FAROUK, A.; ROSNER, K.; GREINER, R.; BOCHOW, H.; RICHTER, T.; BORRIS, R. Extracellular phytase activity of *Bacillus amyloliquefaciens* FZB45 contributes to its plant-growth-promoting effect. *Microbiology*, v. 148, p. 2097-2109, 2002.

ITO, T.; MASUBUCHI, M. Dereplication of microbial extracts and related analytical technologies. *The Journal of Antibiotics*, v. 67, n. 5, p. 353-360, 2014.

JABER, L.R.; OWNLEY, B.H. Can we use entomopathogenic fungi as endophytes for dual biological control of insect pests and plant pathogens? *Biological Control*, v. 116, p. 36-45, 2018.

JACOBS, M. J.; BUGBEE, W. M.; GABRIELSON, D. A. Enumeration, location, and characterization of endophytic bacteria within sugar beet roots. *Canadian Journal of Botany*, v. 63, n. 7, p. 1262-1265, 1985.

- JANSSON, R. K.; DYBAS, R. A. Avermectins: biochemical mode of action, biological activity and agricultural importance. In: ISHAYA, I.; DEGHEELE, D. (eds.). **Insecticides with novel modes of action**. Heidelberg: Springer, Berlin: Heidelberg, 1998. p. 152-170.
- JONES, M. B.; NIERMAN, W. C.; SHAN, Y.; FRANK, B. C.; SPOERING, A.; LING, L.; PEOPLES, A.; ZULLO, A.; LEWIS, K.; NELSON, K. E. Reducing the bottleneck in discovery of novel antibiotics. **Microbial Ecology**, v. 73, n. 3, p. 658-667, 2017.
- JOSE, P.A.; MAHARSHI, A.; JHA, B. Actinobacteria in natural products research: Progress and prospects. **Microbiological Research**, v. 246, 126708, 2021.
- KAVAMURA, V. N.; SANTOS, S. N.; SILVA, J. L.; PARMA, M. M.; AVILA, L. A.; VISCONTI, A.; ZUCCHI, T. D.; TAKETANI, R. G.; ANDREOTE, F. D.; MELO, I. S. Screening of Brazilian cacti rhizobacteria for plant growth promotion under drought. **Microbiological Research**, v. 168, n. 4, p. 183-191, 2013a.
- KAVAMURA, V. N.; TAKETANI, R. G.; LANÇONI, M. D.; ANDREOTE, F. D.; MENDES, R.; MELO, I. S. Water regime influences bulk soil and rhizosphere of *Cereus jamacaru* bacterial communities in the Brazilian Caatinga biome. **PLoS ONE**, v. 8, n. 9, e73606, 2013b.
- KELLER, M.; ZENGLER, K. Tapping into microbial diversity. **Nature Reviews Microbiology**, v. 2, p. 141-150, 2004.
- KHALID, S.; AHMAD, T.; SHAD, R. A. Use of Allelopathy in Agriculture. **Asian Journal of Plant Sciences**, v. 1, p. 292-297, 2002.
- KUMAR, V.; KUMAR, P.; SINGH, J. An introduction to contaminants in agriculture and environment. In: KUMAR, V.; KUMAR, P.; SINGH, J.; KUMAR, P. **Contaminants in agriculture and environment: health risks and remediation**, chapter. 1, p. 1-8, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.26832/AESA-2019-CAE-0159-01>.
- LACERDA-JÚNIOR, G. V.; NORONHA, M. F.; CABRAL, L.; DELFORNO, T. P.; DE SOUSA, S. T. P.; FERNANDES-JÚNIOR, P. I.; MELO, I. S.; OLIVEIRA, V. M. Land use and seasonal effects on the soil microbiome of a Brazilian dry forest. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, n. 648, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2019.00648>.
- LACERDA-JÚNIOR, G. V.; NORONHA, M. F.; DE SOUSA, S. T.; CABRAL, L.; DOMINGOS, D. F.; SÁBER, M. L.; DE MELO, I. S.; OLIVEIRA, V. M. Potential of semiarid soil from Caatinga biome as a novel source for mining lignocellulose-degrading enzymes. **FEMS Microbiol Ecology**, v. 93, n. 2, Feb. 2017, fiw248. DOI: <https://dx.doi.org/10.1093/femsec/fiw248>.
- LAURETI, L.; SONG, L.; HUANG, S.; CORRE, C.; LEBLOND, P.; CHALLIS, G. L.; AIGLE, B. Identification of a bioactive 51-membered macrolide complex by activation of a silent polyketide synthase in *Streptomyces ambifaciens*. **PNAS**, v. 108, n. 15, p. 6258-6263, 2011.
- LIU, C.; KAKEYA, H. Cryptic chemical communication: secondary metabolic responses revealed by microbial co-culture. **Chemistry—An Asian Journal**, v. 15, n. 3, p. 327-337, 2020.
- LIU, Z.; ZHAO, Y.; HUANG, C.; LUO, Y. Recent advances in silent gene cluster activation in *Streptomyces*. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 9, article 632230, 2021.

LOCEY, K. J.; LENNON, J. T. Scaling laws predict global microbial diversity. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 113, n. 21, p. 5870-5975, May 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1073/pnas.1521291113>.

LYNCH, J. M. **The rhizosphere**. New York: John Wiley, 1990. 458 p.

MA, B.; LV, X.; WARREN, A.; GONG, J. Shifts in diversity and community structure of endophytic bacteria and archaea across root, stem and leaf tissues in the common reed, *Phragmites australis*, along a salinity gradient in a marine tidal wetland of northern China. **Antonie Van Leeuwenhoek**, v. 104, p. 759-768, 2013.

MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; BENDER, K. S.; BUCKLEY, D. H.; STAHL, D. A. (ed.). **Brock biology of microorganisms**. 14. ed. [S. l.]: Global Edition, Pearson, 2015. Disponível em: <https://www.pearson.com/uk/educators/higher-education-educators/program/Madigan-Brock-Biology-of-Microorganisms-Global-Edition-14th-Edition/PGM1076927.html?tab=resources>. Acesso em: 14 mar. 2021.

MARSCHNER, P.; CROWLEY, D.; YANG, C. H. Development of specific rhizosphere bacterial communities in relation to plant species, nutrition and soil type. **Plant and Soil**, v. 261, n. 1-2, p. 199-208, 2004.

MARTINS, T.; SCHINKE, C.; QUEIROZ, S. C. N.; BRAGA, P. A. C.; SILVA, F. S.; MELO, I. S.; REYES, F. G. Role of bioactive metabolites from *Acremonium camptosporum* associated with the marine sponge *Aplysina fulva*. **Chemosphere**, 274, article 129753, July 2021.

MAY, A.; DOS SANTOS, M. S.; SILVA, EVANDRO, H. F. M.; VIANA, R. S.; VIEIRA JUNIOR, N. AP.; RAMOS, N. P.; MELO, I. S. Effect of *Bacillus aryabhatai* on the initial establishment of pre-sprouted seedlings of sugarcane varieties. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, e11510212337, 2021.

McINROY, J. A.; KLOEPPER, J. W. Survey of indigenous bacterial endophytes from cotton and sweet corn. **Plant and Soil**, v. 173, p. 337-342, 1995.

MELO, I. S.; SANTOS, S. N.; ROSA, L. H.; PARMA, M. M.; SILVA, L. J.; QUEIROZ, S. C.; PELLIZARI, V. H. Isolation and biological activities of an endophytic *Mortierella alpina* strain from the Antarctic moss *Schistidium antarctici*. **Extremophiles**, v. 18, n. 1, p. 15-23, 2014.

MELO, I. S.; SOUZA, W. R.; SILVA, L. J.; SANTOS, S. N.; ASSALIN, M. R.; ZUCCHI, T. D.; QUEIROZ, S. C. N. Antifungal Activity of *Pseudomonas frederiksbergensis* CMAA 1323 Isolated from the Antarctic hair grass *Deschampsia antarctica*. **British Microbiology Research Journal**, v. 14, p. 1-11, 2016.

MIYAMOTO, T.; KAWAHARA, M.; MINAMISAWA, K. Novel endo-phytic nitrogen-fixing clostridia from the grass *Miscanthus sinensis* as revealed by terminal restriction fragment length polymorphism analysis. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 70, p. 6580-6586, 2004.

MONIER, J. M.; LINDOW, S. E. Frequency, size, and localization of bacterial aggregates on bean leaf surfaces. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 70, p. 346-355, 2004.

MORIN, L. Progress in biological control of weeds with plant pathogens. **Annual Review of Phytopathology**, v. 58, p. 201-223, 2020.

MURAD, A. M.; LAUMANN, R. A.; LIMA, T. DE A.; SARMENTO, R. B.C.; NORONHA, E. F.; ROCHA, T. L.; VALADARES-INGLIS, M. C.; FRANCO, OCTÁVIO L. Screening of entomopathogenic *Metarhizium anisopliae*

- isolates and proteomic analysis of secretion synthesized in response to cowpea weevil (*Callosobruchus maculatus*) exoskeleton. **Comparative Biochemistry and Physiology**, Part C, v. 142, p. 365-370, 2006.
- MWAJITA, M. R.; MURAGE, H.; TANI, A.; KAHANGI, E. M. Evaluation of rhizosphere, rhizoplane and phyllosphere bacteria and fungi isolated from rice in Kenya for plant growth promoters. **SpringerPlus**, v. 2, article 606, 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1186/2193-1801-2-606>.
- NANDAKUMAR, R.; SHAHJAHAN, A. K.; YUAN, X. L.; DICKSTEIN, E. R.; GROTH, D. E.; CLARK, C. A.; CARTWRIGHT, R. D.; RUSH, M. C. *Burkholderia glumae* and *B. gladioli* cause bacterial panicle blight in rice in the southern United States. **Plant Disease**, v. 93, n. 9, p. 896-905, 2009.
- NECHET, K. L.; HALFELD-VIEIRA, B. A. Development of *Cercospora* leaf spot on *Ipomoea* weed species for biological control. **Biocontrol**, v. 64, p.185-195, 2019.
- NECHET, K. L.; VITORINO, M. D.; VIEIRA, B. S.; HALFELD-VIEIRA, B. A. Weeds. In: SOUZA, B.; VÁZQUEZ, L.; MARUCCI, R. (ed.). **Natural enemies of insect pests in neotropical agroecosystems: biological control and functional biodiversity**. Cham: Springer, 2019. Cap. 35. p. 437-449.
- NGARA, T. R.; ZHANG, H. Recent advances in function-based metagenomic screening. **Genomics Proteomics Bioinformatics**, v. 16, n. 6, p. 405-415, 2018.
- NWOKOLO, N. L.; ENEBE, M. C.; CHIGOR, C. B.; CHIGOR, V. N.; DADA, O. A. The contributions of biotic lines of defence to improving plant disease suppression in soils: A review. **Rhizosphere**, v. 19, 100372, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100372>.
- OCHI, K. From microbial differentiation to ribosome engineering. **Bioscience, Biotechnology and Biochemistry**, v. 71, n. 6, p. 1373-1386, 2007.
- OFAIM, S.; OFEK-LALZAR, M.; SELA, N.; JINAG, J.; KASHI, Y.; MINZ, D.; FREILICH, S. Analysis of microbial functions in the rhizosphere using a metabolic-network based framework for metagenomics interpretation. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, article1606, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2017.01606>.
- ONGENA, M.; JACQUES, P. *Bacillus* lipopeptides: versatile weapons for plant disease biocontrol. **Trends in Microbiology**, v. 16, p. 115-125, 2008.
- PETRINI, O.; FISHER, P. J. A comparative study of fungal endophytes in xylem and whole stems of *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica*. **Transactions of the British Mycological Society**, v. 91, p. 233-238, 1988.
- PRAYOGO, F. A.; BUDIHARJO, A.; KUSUMANINGRUM, H. P.; WIJANARKA, W.; SUPRIHADI, A.; NURHAYATI, N. Metagenomic applications in exploration and development of novel enzymes from nature: a review. **Journal of Genetic Engineering & Biotechnology**, v. 18, n. 1, 39, 2020.
- PRIHODA, D.; MARITZ, J. M.; KLEMPER, O.; DZAMBA, D.; WOELK, C. H.; HAZUDA, D. J.; BITTON, D. A.; HANNIGAN, G. D. The application potential of machine learning and genomics for understanding natural product diversity, chemistry, and therapeutic translatability. **Natural Product Reports**, v. 38, p. 1100-1108, 2021.
- PUSHPANATHAN, M.; GUNASEKARAN, P.; RAJENDHRAN, J. Mechanisms of the antifungal action of marine metagenome-derived peptide, MMGP1, against *Candida albicans*. **PLoS One**, v. 8, n. 7, e69316, 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0069316>.

- RAMASAMY, D.; MISHRA, A. K.; LAGIER, J. C.; MORGANE ROSSI, R. P.; SENTAUSA, E.; RAOULT, D.; FOURNIER, P. E. A polyphasic strategy incorporating genomic data for the taxonomic description of novel bacterial species. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, v. 64, p. 384-391, 2014.
- RODRIGUES, J. P.; PETI, A. P. F.; FIGUEIRÓ, F. S.; DE SOUZA ROCHA, I.; JUNIOR, V. R. A.; SILVA, T. G.; MELO, I. S.; BEHLAU, F.; MORAES, L. A. B. Bioguided isolation, characterization and media optimization for production of Lysolipins by actinomycete as antimicrobial compound against *Xanthomonas citri* subsp. *citri*. *Molecular Biology Reports*, v. 45, n. 6, p. 2455-2467, 2018.
- RODRIGUES, K. A.; HESSE, M.; WERNER, C. Antimicrobial activities of secondary metabolites produced by endophytic fungi from *Spondias mombin*. *Journal of Basic Microbiology*, v. 40, n. 4, p. 261-267, 2000.
- RODRÍGUEZ, H.; FRAGA, R. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, v. 17, p. 319-339, 1999.
- ROMANO, S.; JACKSON, S. A.; PATRY, S.; DOBSON, A. D. Extending the “one strain many compounds” (OSMAC) principle to marine microorganisms. *Marine Drugs*, v. 16, n. 7, p. 244, 2018.
- ROVIRA, A. D. Interactions between plant roots and soil microorganisms. *Annual Review of Microbiology*, v. 19, p. 241-266, 1965.
- RYAN, P. R.; DELHAIZE, E. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots, *Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology*, v. 52, p. 527-560, 2001.
- SANTANA-PEREIRA, A. L. R.; SANDOVAL-POWERS, M.; MONSMA, S.; ZHOU, J.; SANTOS, S. R.; MEAD, D. A.; LILES, M. R. Discovery of novel biosynthetic gene cluster diversity from a soil metagenomic library. *Frontiers in Microbiology*, v. 11, 585398, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2020.585398>.
- SANTOS, S. N.; FERRARIS, F. K.; SOUZA, A. O.; HENRIQUES, M. G.; Melo, I. S. Endophytic fungi from *Combretum leprosum* with potential anticancer and antifungal activity. *Symbiosis*, v. 12, p. 0218-0225, 2012.
- SAXENA, S.; PANDEY, A. K. Microbial metabolites as eco-friendly agrochemicals for the next millennium. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 55, n. 4, p. 395-403, 2001.
- SCHLATTER, D.; KINKEL, L.; THOMASHOW, L.; WELLER, D.; PAULITZ, T. Disease Suppressive Soils: New Insights from the Soil Microbiome. *Phytopathology*, v. 107, p. 1284-1297, 2017.
- SHARMA, V.; KUMAR, R.; SHARMA, V. K.; YADAV, A. K.; TIIROLA, M.; SHARMA, P. K. Expression, purification, characterization and in silico analysis of newly isolated hydrocarbon degrading bleomycin resistance dioxigenase. *Molecular Biology Reports*, v. 47, p. 533-544, 2020.
- SHEN, B. A new golden age of natural products drug discovery. *Cell*, v. 163, n. 6, p. 1297-1300, 2015.
- SILVA, F. S. P. **Bioprospecção de actinobactérias associadas à esponja marinha *Aplysina fulva*: isolamento, caracterização e produção de compostos bioativos.** 2015. 159 f. Tese (Doutorado em Ciências (Microbiologia Agrícola) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

- SILVA, L. J.; CREVELIN, E. J.; SOUZA, D. T.; LACERDA-JÚNIOR, G. V.; de OLIVEIRA, V. M.; RUIZ, A. L. T. G.; ROSA, L.H.; MORAES, L.A.B.; MELO, I. S. Actinobacteria from Antarctica as a source for anticancer discovery. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 1-15, 2020.
- SILVA, T. R.; DUARTE, A. W. F.; PASSARINI, M. R. Z.; RUIZ, A. L. T. G.; FRANCO, C. H.; MORAES, C. B.; Melo, I. S.; Rodrigues, R. A.; FANTINATTI-GARBOGGINI, F.; OLIVEIRA, V. M. Bacteria from Antarctic environments: diversity and detection of antimicrobial, antiproliferative, and antiparasitic activities. *Polar Biology*, v. 41, n. 7, p. 1505-15192, 2018.
- SOUZA, D. T. *Exploração da diversidade bacteriana de esponjas marinhas por abordagens dependente e independente de cultivo*. 2016. 202 p. Tese (Doutorado em Ciências (Microbiologia Agrícola) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- SOUZA, D. T.; GENUÁRIO, D. B.; SILVA, F. S. P.; PANSA, C. C.; KAVAMURA, V. N.; MORAES, F. C.; TAKETANI, R.G.; MELO, I. S. Analysis of bacterial composition in marine sponges reveals the influence of host phylogeny and environment. *FEMS Microbiology Ecology*, v. 93, n. 1, f1w204, 2017.
- STEVENSON, B. S.; EICHORST, S. A.; WERTZ, J. T.; SCHMIDT, T. M.; BREZNAK, J. A. New strategies for cultivation and detection of previously uncultured microbes. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 70, p. 4748-4755, 2004.
- STEWART, E. J. Growing unculturable bacteria. *Journal of Bacteriology*, v. 194, n. 16, p. 4151-4160, 2012.
- STROBEL, G.; DAISY, B.; CASTILLO, U.; HARPER, J. Natural products from endophytic microorganisms. *Journal of Natural Products*, v. 67, n. 2, p. 257-268, 2004.
- SUBRAMANI, R.; SIPKEMA, D. Marine rare actinomycetes: a promising source of structurally diverse and unique novel natural products. *Marine Drugs*, v. 17, n. 5, p. 249, 2019.
- TANAKA, T.; KAWASAKI, K.; DAIMON, S.; KITAGAWA, W.; YAMAMOTO, K.; TAMAKI, H.; TANAKA, M.; NAKATSU, C.H.; KAMAGATA, Y. A hidden pitfall in the preparation of agar media undermines microorganism cultivability. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 80, n. 24, p. 7659-7666, 2014.
- TAN, H.; WU, X.; XIE, L.; HUANG, Z.; PENG, W.; GAN, B. Identification and characterization of a mesophilic phytase highly resilient to high-temperatures from a fungus-garden associated metagenome. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 100, p. 2225-2241, 2016.
- THOMAS, A. T.; RAO, J. V.; SUBRAHMANYAM, V. M., CHANDRASHEKHAR, H. R., MALIYAKKAL, N., KISAN, T. K.; JOSEPH, A.; UDUPA, N. *In vitro* anticancer activity of microbial isolates from diverse habitats. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, v. 4, p. 279-287, 2011.
- THOMPSON, G. D.; DUTTON, R.; SPARKS, T. C. Spinosad –a case study: an example from a natural products discovery programme. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science*, v. 56, n. 8, p. 696-702, 2000.
- TRIVELLA, D. B. B.; FELICIO, R. The tripod for bacterial natural product discovery: Genome mining, silent pathway induction, and mass spectrometry-based molecular networking. *mSystems*, v. 3, e00160-e17, 2018.
- VALENCIA, E. Y.; CHAMBERGO, F. S. Mini-review: Brazilian fungi diversity for biomass degradation. *Fungal Genetics and Biology*, v. 60, p. 9-18, 2013.

VASCONCELLOS, R. L. F.; ROMAGNOLI, E. M.; TAKETANI, R. G.; SANTOS, S. N.; ZUCCHI, T. D.; MELO, I. S. Impact of inoculation with *Pseudomonas aestus* CMAA 1215<sup>T</sup> on the non-target resident bacterial community in a saline rhizosphere soil. **Current Microbiology**, v. 78, n. 1, p. 218-228, 2021.

VASCONCELLOS, R. L. F.; SANTOS, S. N.; ZUCCHI, T. D.; SILVA, F. S. P.; SOUZA, D. T.; MELO, I. S. *Pseudomonas aestus* sp. nov., a plant growth-promoting bacterium isolated from mangrove sediments. **Archives of Microbiology**, v. 199, p. 1223-1229, 2017.

VORHOLT, J. A. Microbial life in the phyllosphere. **Nature Reviews Microbiology**, v. 10, n. 12, p. 828-840, 2012.

WANG, H.; VAN DER DONK, W. A. Biosynthesis of the class III lantipeptide catenulipeptin. **Chemical Biology**, v. 7, n. 9, p. 1529-1535.

WESTWOOD, J. H.; CHARUDATTAN, R.; DUKE, S. O.; FENNIMORE, S. A.; MARRONE, P. G.; SLAUGHTER, D.; SWANTON, C. J.; ZOLLINGER, R. Weed management in 2050: perspectives on the future of weed science. **Weed Science**, v. 66, p. 275-285, 2018.

WISNIEWSKI, M.; WILSON, C.; DROBY, S.; CHALUTZ, E.; EL-GHAOUTH, A.; STEVENS, C. Postharvest biocontrol: new concepts and applications. In: VINCENT, C.; GOETTEL, M. S.; LAZAROVITIS, G. (eds.). **Biological Control: A Global Perspective**. Wallingford: Cabi Publishing. 2007. p. 262-273.

YAN, Y.; LIU, Q.; JACOBSEN, S. E.; TANG, Y. The impact and prospect of natural product discovery in agriculture: New technologies to explore the diversity of secondary metabolites in plants and microorganisms for applications in agriculture. **EMBO Reports**, v. 19, n. 11, e46824, 2018.

ZOU, W. X.; MENG, J. C.; LU, H.; CHEN, G. X.; SHI, G. X.; ZHANG, T. Y.; TAN, R. X. Metabolites of *Colletotrichum gloeosporioides*, an endophytic fungus in *Artemisia mongolica*. **Journal of Natural Products**, v. 63, p. 1529-1530, 2000.



# CONTROLE BIOLÓGICO DE DOENÇAS DE PLANTAS

Wagner Bettiol, Itamar Soares de Melo, Daniel Terao, Bernardo Almeida Halfeld-Vieira, Rodrigo Mendes, Marcelo Augusto Boechat Morandi e Gabriel Moura Mascarin

## INTRODUÇÃO

O controle biológico de doenças de plantas pode ser conceituado como “a redução da densidade de inóculo ou das atividades determinantes da doença, provocada por um patógeno, realizada por um ou mais organismos que não o homem”. Controle biológico natural, conservacionista, clássico e aumentativo são os quatro tipos de controle biológico conhecidos. Sem dúvida, o controle biológico natural em que as doenças são controladas por antagonistas de ocorrência natural, sem qualquer intervenção humana, é o mais importante para a agricultura e o mais sustentável. O controle biológico natural ocorre em todos os ambientes, contudo, apesar da importância, é o mais desconhecido. O controle biológico conservacionista consiste em ações humanas para proteger e estimular a preservação e o aumento natural de agentes benéficos, sendo a indução de supressividade aos patógenos habitantes do solo um de seus aspectos, tendo sua importância aumentada com os novos conhecimentos do microbioma. O controle biológico clássico ocorre por meio de coleta dos antagonistas da área de origem do patógeno e liberação em áreas onde se deseja elevar o número de agentes de biocontrole. O último tipo, possivelmente o mais conhecido, é o controle biológico aumentativo, em que os antagonistas são aplicados de maneira massal em uma cultura agrícola. O controle biológico aumentativo é o mais conhecido entre os agricultores, pois tem como base a aplicação de agentes de biocontrole disponíveis no mercado. Entre os antagonistas comercializados, fungos do gênero *Trichoderma* e bactérias do gênero *Bacillus* são os mais conhecidos.

O controle biológico possivelmente é o método mais bem-sucedido, tanto econômica como ambientalmente (Lenteren, 1997; Lenteren et al., 2018), e é uma ferramenta importante para a sustentabilidade agrícola.

No controle biológico aumentativo, o principal objetivo é o desenvolvimento de um produto microbiano para o manejo de doenças de plantas, como bioprotetor contra patógenos, incluindo fungos, bactérias e nematoides, e sua comercialização em

grande escala para os agricultores. O mercado global de bioprotetores foi estimado em US\$ 5,08 bilhões em 2020 e está projetado para chegar a US\$ 11,43 bilhões em 2026, com uma taxa composta de crescimento anual (CAGR) projetada para 14,5% nesse período (Research and Markets, 2021).

Em 1986, quando a Embrapa Meio Ambiente iniciou os estudos com controle biológico de doenças de plantas, não existiam produtos biológicos disponíveis no mercado brasileiro. Para 2021, a estimativa é de que o mercado brasileiro de produtos biológicos totalize R\$1,8 bilhão, com crescimento de 33%. Além disso, dados da Consultoria Blink Projetos Estratégicos com a CropLife, divulgados em 19 de abril de 2021, projetam que o mercado de produtos biológicos deve chegar a R\$3,7 bilhões em 2030, no Brasil (Fraga, 2021). Um aspecto a ser destacado é o fato de a Embrapa Meio Ambiente ter participado de praticamente todas as etapas do desenvolvimento do controle biológico no Brasil, realizando pesquisas básicas e aplicadas; formando profissionais por meio das orientações de estudantes de mestrado e doutorado na área; participando das discussões sobre legislação junto ao Mapa, ao Ibama e à Anvisa; divulgando o controle biológico por meio da edição de diversos livros e outras publicações; mantendo uma coleção de microrganismos de importância agrícola e ambiental; e tendo importante papel na criação da Associação Brasileira das Empresas de Controle Biológico (ABC BIO – atualmente, na CropLife). Portanto, a Embrapa Meio Ambiente desempenhou um papel relevante para o crescimento do setor.

Contudo, para que o mercado brasileiro continue crescendo, é necessário um forte investimento em pesquisa e no desenvolvimento de novos produtos contendo novos ingredientes ativos. É importante considerar que o crescimento projetado depende da disponibilidade de novos bioprotetores. Consequentemente, é necessário isolar e selecionar novos microrganismos com potencial para controlar com eficiência doenças de plantas, bem como desenvolver produtos comercializáveis (Cotes et al., 2019). Atualmente, um número limitado de espécies de microrganismos é explorado comercialmente como bioprotetores, por exemplo, embora 400 espécies de *Trichoderma* sejam conhecidas (Bisset et al., 2015), apenas dez delas são comercializadas como agentes de biocontrole (Bettiol et al., 2019a, 2019b).

O uso de produtos biológicos, bioprotetores ou biopesticidas está em ampla expansão em todo o mundo. No Brasil, a área sob controle biológico de pragas e doenças com inimigos naturais e antagonistas é superior a 30 milhões de hectares, considerando informações de 2017 (números detalhados podem ser obtidos em Bueno et al. (2020)). Contudo, atualmente, esse número é consideravelmente maior, sobretudo ao se considerar a produção “on-farm” ou “caseira” de alguns agentes de biocontrole (sem dados disponíveis).

Desse modo, neste capítulo serão abordadas justamente essas contribuições da Embrapa Meio Ambiente no desenvolvimento do controle biológico de doenças de plantas no Brasil.

## CONTROLE BIOLÓGICO CONSERVACIONISTA

### Indução da supressividade dos solos pela incorporação de matéria orgânica

Os principais estudos realizados pela Embrapa Meio Ambiente na área de controle biológico conservacionista são relacionados com a indução da supressividade dos solos a fitopatógenos habitantes do solo, como *Fusarium oxysporum*, *Macrophomina phaseolina*, *Meloidogyne javanica*, *Pythium*, *Phytophthora*, *Rhizoctonia solani*, *Sclerotium rolfsii*, *Sclerotinia sclerotiorum* e *Stenoscarpella* spp. entre outros, por meio do uso de matéria orgânica e outras práticas culturais, bem como do recrutamento de microrganismos pelas próprias plantas.

O fenômeno que alguns solos apresentam de prevenir o estabelecimento de patógenos ou inibir suas atividades patogênicas é denominado supressividade. Solos que apresentam essa característica são denominados solos supressivos. Por outro lado, solos conducentes são aqueles que não apresentam essa característica (Bettiol; Ghini, 2005). Solos supressivos são comuns em ambientes onde os constituintes físicos, químicos e biológicos se estabilizaram no decorrer do tempo. A supressividade também é uma característica que pode ser induzida por meio de manejo adequado dos solos (Schneider, 1982). Uma das maneiras de se induzir supressividade é por meio da incorporação de matéria orgânica com características adequadas para essa finalidade (Bettiol; Ghini, 2005; Bettiol et al., 2009; Bonanomi et al., 2010, 2017, 2018, 2020).

A incorporação de matéria orgânica dos solos, além do suprimento de macro e micronutrientes e de melhorar a estrutura dos solos, aumenta a capacidade dos solos em suportar intensa atividade biológica dos organismos, muitos destes diretamente relacionados à indução de supressividade a fitopatógenos. Além de suportar a atividade microbiana, a decomposição da matéria orgânica libera diversas substâncias no ambiente, tais como os compostos voláteis e não voláteis que podem ser tóxicos aos fitopatógenos; hormônios, aminoácidos e outras substâncias que podem induzir a resistência da planta aos fitopatógenos. Contudo, dependendo do patógeno e do solo, algumas fontes de matéria orgânica podem induzir a supressividade, não apresentar ação ou mesmo aumentar os problemas com doenças. Assim, é fundamental realizar estudos detalhados sobre o efeito de cada fonte de matéria orgânica.

A Embrapa Meio Ambiente realiza estudos sobre o uso agrícola e florestal do lodo de esgoto desde 1998 (Bettiol; Camargo, 2000), sendo uma das linhas de estudos a indução de supressividade dos solos ou substratos por meio da incorporação de lodo de esgoto, compostado ou não compostado. Os efeitos de lodos de esgotos na indução da supressividade a fitopatógenos habitantes do solo foram demonstrados por diversos autores (Millner et al., 1982; Lumsden et al., 1983; Bettiol; Krugner, 1984; Lumsden et al., 1986; Kuter et al., 1988; Lewis et al., 1992; Nelson; Craft, 1992; Nelson; Boehm, 2002;

Santos; Bettiol, 2003; Leoni; Ghini, 2006; Ghini et al., 2007; Heck et al., 2019). Contudo, o lodo de esgoto também pode tornar o solo conducente a fitopatógenos, como demonstrado por Bettiol (2004) e Ghini et al. (2016).

Utilizando lodos de esgotos gerados nas estações de tratamento de esgotos de Franca, Barueri e Jundiaí, os estudos realizados na Embrapa Meio Ambiente relatam redução de incidência e severidade a diversas doenças, como: podridões de raízes em sorgo causadas por *Pythium arrhenomanes* (Bettiol; Krügner, 1984); tombamento em pepino causado por *Pythium aphanidermatum* (Santos et al., 2000); tombamento e podridão do colo em feijão causados por *Sclerotium rolfsii* (Santos; Bettiol, 2003); aos nematoides *Meloidogyne javanica* e *Heterodera glycines* em soja (Araújo; Bettiol, 2005); tombamento em mudas de citros causado por *Phytophthora nicotianae* (Leoni; Ghini, 2006); murcha bacteriana do tomateiro, causada por *Ralstonia solanacearum* (Ghini et al., 2007); tombamento do rabanete, causado por *R. solani* (Ghini et al., 2007); tombamento murcha de *Fusarium* em crisântemo, causado por *Fusarium oxysporum* f. sp. *chrysanthemi* (Pinto et al., 2013); murcha de *Fusarium* em bananeira, causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Heck et al., 2019); podridão da haste em milho causada por *Stenocarpella* (Faria et al., 2020) entre outras. Contudo, também existem relatos de que lodo de esgoto não interferiu na incidência da murcha de *Fusarium* do tomateiro causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Ghini et al., 2007) e sobre a ocorrência de *Rhizoctonia solani* e *Macrophomina phaseolina* na soja (Araújo; Bettiol, 2009). Há, ainda, relatos de aumento de doenças com a incorporação de lodo de esgoto, como os de Ghini et al. (2016) e Bettiol (2004) sobre a podridão da haste de milho causada por *Fusarium*. Araújo e Bettiol (2009) também verificaram que a redução na severidade de oídio (*Erysiphe difusa*) da soja foi diretamente proporcional à concentração de lodo de esgoto incorporado ao solo. Diversos outros estudos com lodo de esgoto estão relatados em Bettiol e Ghini (2011).

O aumento da atividade microbiana dos solos, bem como daquela relacionada aos próprios microrganismos do lodo de esgoto, está ligado à redução de doenças com a incorporação do lodo de esgoto (Chen et al., 1987; Craft; Nelson, 1996; Dissanayake; Hoy, 1999; Santos; Bettiol, 2003; Ghini et al., 2007). Também são importantes as alterações nas propriedades físicas e químicas dos solos, como aumento da condutividade elétrica e alteração no pH do solo, entre outras (Cotxarrera et al., 2002; Santos; Bettiol, 2003; Heck et al., 2019), os efeitos dos compostos tóxicos (ácidos graxos voláteis, ácido nitroso, amônia) presentes ou liberados durante a decomposição e, também, os efeitos indiretos por estimular os microrganismos dos solos (Dissanayake; Hoy, 1999; Hoitink; Boehm, 1999; Tenuta; Lazarovits, 2002; Borrero et al., 2006; Heck et al., 2019). Assim, para permitir o uso seguro do lodo de esgoto na agricultura, é fundamental identificar os fatores que determinam os efeitos da incorporação de lodo de esgoto sobre a supressividade dos solos.

Além do lodo de esgoto, foram estudados os efeitos de outras matérias orgânicas na indução da supressividade do solo a doenças de plantas, como: esterco de vaca no controle do tombamento causado por *Pythium* em pepino (Bettiol et al., 1997); cama de frango no controle de *Pythium* em pepino (Ghini et al., 2002); hidrolisado e emulsão de peixe e casca de camarão no controle de *Cylindrocladium spathiphylli* em espatifilo (Bettiol; Visconti, 2013; Visconti et al., 2010); emulsão e hidrolisado de peixe no controle de *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* e *Fusarium oxysporum* f. sp. *lactucae* (Bettiol et al., 2014); casca de camarão, concha de mariscos e biocarvão no controle da murcha da bananeira causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* (Heck et al., 2019); biocarvão no controle da murcha de *Fusarium* causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (Silva et al., 2020); entre outros.

### A supressividade dos solos e o microbioma da rizosfera

O desenvolvimento de técnicas moleculares avançadas ocorrido a partir do sequenciamento do genoma humano em 2003, especialmente o sequenciamento de DNA em larga escala, permitiu o estudo detalhado de comunidades microbianas complexas, por exemplo, as comunidades microbianas associadas à supressão de fitopatógenos habitantes do solo. A Embrapa Meio Ambiente participou e coordenou estudos pioneiros nessa área, revelando como consórcios microbianos interagem com a planta na rizosfera para atuar como a primeira linha de defesa da planta contra patógenos que têm origem no solo. Em experimentos conduzidos com plântulas de beterraba açucareira e o patógeno *Rhizoctonia solani*, foram identificados microrganismos, bem como suas respectivas funções, que agem como uma barreira protetora na rizosfera (Mendes et al., 2011). Dois testes foram conduzidos para demonstrar a natureza microbiológica dos solos supressivos. Inicialmente, observou-se que o solo supressivo, após ser aquecido a 80 °C por uma hora, se torna conducente ao ser infectado com *R. solani*. Em seguida, observou-se que, quando uma porção de solo supressivo (10% v/v) é misturada ao solo conducente, as plantas cultivadas no solo originalmente conducente apresentam uma diminuição significativa na incidência da doença. Essas duas observações revelaram que o microbioma da rizosfera (Mendes et al., 2013) desempenha papel fundamental na proteção da planta e que essa proteção ocorre em decorrência da ação de um complexo consórcio de microrganismos (Mendes et al., 2011).

Utilizando uma abordagem multi “ômica”, incluindo metagenômica, metataxonômica e metatranscriptômica, foi proposto um modelo de como ocorre a blindagem do sistema radicular pelo microbioma da rizosfera durante a invasão pelo patógeno em um solo supressivo (Chapelle et al., 2015). Ao ter a região da rizosfera invadida pelo fungo, a planta dispara uma sinalização para a comunidade bacteriana, ocasionando

duas mudanças: i) aumento da abundância de famílias bacterianas específicas na rizosfera; e ii) ativação de funções relacionadas à resposta geral ao estresse bacteriano (Chapelle et al., 2015).

Considerando que, além da rizosfera, o interior das raízes, isto é, a endosfera, também é colonizada por uma complexa comunidade de microrganismos, foram realizados experimentos adicionais demonstrando que, no caso de o patógeno superar a primeira linha de defesa da planta e atingir o interior das raízes, o microbioma da endosfera se mobiliza para proteger a planta contra a infecção (Carrión et al., 2019). Semelhantemente ao que acontece na rizosfera, no interior das raízes ocorre o enriquecimento de membros específicos da comunidade microbiana e a ativação de grupos gênicos biossintéticos bacterianos que impedem o progresso da infecção (Carrión et al., 2019). Neste sentido, os microbiomas da rizosfera e da endosfera funcionam como uma extensão do sistema de defesa da planta contra doenças causadas por patógenos habitantes do solo, compondo, respectivamente, a primeira e a segunda linha de defesa microbiológica da planta.

## CONTROLE BIOLÓGICO AUMENTATIVO

### Isolamento e seleção de antagonistas

Detalhes sobre isolamento e seleção de antagonistas são abordados no capítulo “Bioprospecção de microrganismos com potencial de uso na agricultura”. Assim, aqui são apresentadas algumas informações sobre controle biológico. Em 1999, teve início o projeto intitulado Biodiversidade de microrganismos endofíticos e seu potencial biotecnológico, financiado pela Fapesp sob coordenação de Itamar Soares de Melo. Nesse projeto, foram obtidos 234 isolados de microrganismos endofíticos do cafeeiro (Nunes, 2004; Shiomi et al., 2006; Silva et al., 2012). Inicialmente, Shiomi et al. (2006) avaliaram os efeitos de 44 isolados de bactérias sobre a inibição da germinação de uredíniosporos de *Hemileia vastatrix* e em bioensaios para o controle do desenvolvimento da ferrugem alaranjada do cafeeiro em discos de folhas, folhas destacadas e mudas da cv. Mundo Novo. Os isolados de bactérias endofíticas demonstraram eficácia na inibição da germinação de uredíniosporos e no controle da ferrugem do cafeeiro, com valores acima de 50%. Nos testes em discos de folhas, folhas destacadas e em plantas de cafeeiro, os isolados endofíticos TG4-Ia, TF2-IIc, TF9-Ia, TG11-IIa e TF7-IIa demonstraram melhor controle da ferrugem do cafeeiro. Os isolados endofíticos TG4-Ia e TF9-Ia foram identificados como *Bacillus lentimorbus* e *Bacillus cereus*, respectivamente. De acordo com os resultados, verifica-se que alguns isolados foram eficientes em controlar a ferrugem do cafeeiro, embora alguns tenham

aumentado a severidade da doença. Posteriormente, Silva et al. (2012) avaliaram um total de 234 isolados, sendo 217 de bactérias e 17 de fungos endofíticos obtidos dos tecidos de cafeeiro, quanto ao potencial de controlar a ferrugem do cafeeiro e promover o crescimento de mudas de café. Os autores observaram que nenhum dos 17 isolados de fungos endofíticos controlaram a ferrugem nem promoveram o crescimento das mudas. Os isolados de bactérias endofíticas 85G (*Escherichia fergusonii*), 161G, 163G, 160G, 150G (*Acinetobacter calcoaceticus*) e 109G (*Salmonella enterica*) promoveram o crescimento das mudas, sendo que o isolado 85G, obtido de ramos de café, foi o mais eficiente. Possivelmente, a capacidade desse isolado em produzir ácido indolacético e fosfatase, *in vitro*, seja a responsável por esse efeito. Os isolados de bactérias endofíticas 64R, 137G, 3F (*Brevibacillus choshinensis*), 14F (*S. enterica*), 36F (*Pectobacterium carotovorum*), 109G (*Bacillus megaterium*), 115G (*Microbacterium testaceum*), e 116G e 119G (*Cedecea davisae*) reduziram significativamente a ferrugem quando aplicados 72 e 24 horas da inoculação do patógeno nos tecidos de café. O isolado 109G foi o mais eficiente em controlar a ferrugem nas condições dos estudos. Com relação à germinação dos uredíniosporos de *H. vastatrix*, o isolado 3F inibiu a germinação em 66%. Os autores não observaram relação entre os isolados que promoveram o crescimento e os que controlaram a doença. Silva et al. (2008) também observaram que bactérias endofíticas do cafeeiro induziram a produção de enzimas relacionadas ao controle da ferrugem do cafeeiro.

No projeto do Programa Biota, financiado pela Fapesp e coordenado por Itamar Soares de Melo entre 2006 e 2011, foram obtidos microrganismos isolados de manguezais (Reyes, 2009). Assim, Corrêa et al. (2011), considerando uma possível similaridade entre as condições dos manguezais e cultivo hidropônico, avaliaram a capacidade de microrganismos de manguezais em controlar a podridão radicular causada por *Pythium aphanidermatum* e para promover o crescimento em pepino hidropônico (*Cucumis sativus*). Os autores concluíram que microrganismos de manguezais podem ter importância funcional no controle biológico da podridão radicular causada por *Pythium aphanidermatum* e na promoção do crescimento do pepineiro cultivado em hidroponia; e que *Gordonia rubripertincta* SO-3B-2 e *Pseudomonas stutzeri* MB-P3A-49 são bactérias promissoras para a promoção de crescimento das plantas não infestadas com o patógeno.

## Controle biológico em pós-colheita

O uso de fungicidas sintéticos é bastante comum no tratamento pós-colheita, por serem de fácil acesso e aplicação e por apresentarem ação curativa e preventiva de infecções. No entanto, seu uso vem se tornando cada vez mais limitado, haja vista a conscientização do consumidor com relação aos riscos causados por esses fungicidas

à saúde e ao ambiente e ao declínio da eficiência dos poucos princípios ativos registrados para o controle químico de podridões em pós-colheita. O uso continuado do mesmo princípio ativo tem levado à seleção de isolados resistentes de fungos causadores de doenças em pós-colheita. Assim, existe uma demanda crescente da cadeia de frutas frescas por tratamentos eficazes para o controle de podridões, que mantenham o frescor e a qualidade das frutas e que sejam seguros e limpos, sem o emprego de fungicidas e outros produtos químicos que deixam resíduos tóxicos.

Entre as estratégias naturais para substituir o uso de fungicidas nos tratamentos pós-colheita, o biocontrole é uma alternativa (Droby et al., 2009).

A Embrapa Meio Ambiente iniciou os estudos com o controle biológico de doenças em pós-colheita em 1988. Bettioli et al. (1989) demonstraram o potencial de *Bacillus subtilis* em controlar a podridão de frutos de banana causada por *Colletotrichum musae*. Em estudos visando ao controle de *Penicillium digitatum*, causador do bolor verde em frutos de laranja orgânica, Bernardo et al. (2008) verificaram que *Paenibacillus lentimorbus* BEM-1 e *Bacillus subtilis* AP-3 controlaram a doença de modo semelhante ao fungicida thiebendazole quando aplicados simultaneamente ou 24 horas após a inoculação do patógeno. Forner et al. (2013), considerando o potencial de *Bacillus subtilis* e *Bacillus licheniformis* no controle de doenças de plantas, avaliaram o potencial desses organismos em controlar o bolor verde em laranjas-pera, associados ou não ao tratamento térmico. De modo geral, o tratamento térmico reduziu a severidade da doença determinada pela área abaixo da curva do progresso da doença nos frutos e a incidência natural de doenças em pós-colheita de laranja-pera. Contudo, os agentes de biocontrole não controlaram a doença, mostrando que os organismos testados não apresentaram atividade curativa contra o bolor verde.

Entre os antagonistas, as leveduras mostram-se como uma alternativa promissora, em razão da estabilidade genética, da efetividade em baixa concentração, da habilidade de agir contra um amplo espectro de fitopatógenos e do fato de a produção de um metabólito tóxico não ser o principal mecanismo de controle das leveduras. Além disso, o controle da temperatura e a umidade relativa do ambiente durante o período de pós-colheita criam condições adequadas para o desenvolvimento dos agentes de biocontrole (Janisiewicz; Korsten, 2002; Wisniewski et al., 2007). Pesquisas conduzidas na Embrapa Meio Ambiente avaliaram sete isolados de leveduras no controle de doenças pós-colheita de manga, laranja e melão.

Bettioli e Mattos (2011), também visando ao controle do bolor verde em laranja, verificaram que as leveduras *Pichia guilliermondii* (L29), *Sporobolomyces roseus* (L41), *Rhodotorula mucilagenosa* (L17), *Sporodibolus pararoseus*, *Pichia* spp. (L4-1), *Debaryomyces hansenii* (L62) e *Pichia membranifaciens* (L21) foram eficientes em reduzir o bolor verde quando aplicadas simultaneamente ou antes da inoculação do patógeno. Além disso, as leveduras não alteraram o sabor dos frutos.

Trabalhando com as leveduras *Sporidiobolus pararoseus* CMAA 1106 (acesso nº KY857564), *Candida* sp. CMAA 1113; três isolados de *Candida membranifaciens* [CMAA 1108 (acesso nº KY856740), CMAA 1110 acesso nº MF186782) e CMAA 1112 (acesso nº MF186783)], e dois isolados de *Meyerozyma guilliermondii* [CMAA 1111 (acesso nº KY857565) e CMAA 1109 (acesso nº MF186639)], Terao et al. (2017a, 2017b) avaliaram o potencial de tais leveduras para controlar doenças em pós-colheita em manga, melão e laranja. Para manga, avaliou-se o controle de *Botryosphaeria dothidea*, principal fungo causador de podridão em mangas na região semiárida do Brasil, onde se concentra a maior produção nacional. Os isolados de *C. membranifaciens* e de *M. guilliermondii* reduziram significativamente a severidade da doença durante 11 dias de armazenamento. O isolado de *C. membranifaciens* (CMAA 1108) foi o que apresentou maior eficiência de controle, superior ao tratamento com o fungicida thiabendazole. Nenhuma das espécies avaliadas produziu substâncias inibidoras contra o fungo *B. dothidea*, indicando que a competição por nutrientes, bem como a formação de biofilmes desempenharam importante função na redução da severidade da podridão em manga (Terao et al., 2017a).

Quanto ao controle do bolor verde da laranja causado pelo fungo *Penicillium digitatum*, Terao et al. (2014) avaliaram a eficiência do isolado CMAA 1112 de *C. membranifaciens* combinando-o com tratamentos físicos, por meio do tratamento hidrotérmico por aspersão e escovação a 55 °C por 30 segundos e irradiação com UV-C a 1,5 kJ m<sup>-2</sup>. O tratamento com a levedura, isoladamente, reduziu significativamente o progresso do bolor verde. No entanto, quando aplicada em combinação com os tratamentos físicos, houve um efeito sinérgico, que elevou o nível de controle da doença. Verificou-se que não houve inibição do crescimento micelial em ensaios de antibiose ou de produção de enzimas líticas, comprovando-se, por meio de análise enzimática, que o principal mecanismo de controle envolvido foi a indução de resistência (Terao et al., 2017b). Com relação ao controle de podridão de *Fusarium* em melão causado por *Fusarium pallidoroseum*, Terao et al. (2014) verificaram que os isolados de *C. membranifaciens* (CMAA 1110), *Candida* sp. (CMAA 1113) e *M. guilliermondii* (CMAA 1111) apresentaram eficiência similar à do fungicida imazalil. Os resultados obtidos comprovam a potencialidade do uso de leveduras no controle biológico de fungos causadores de doenças pós-colheita de manga, melão e laranja como alternativa ao uso de agroquímicos e que a estratégia recomendada é a integração com métodos físicos de controle, como o tratamento hidrotérmico e a radiação UV-C.

## Controle biológico de pragas, nematoides e doenças fúngicas

O controle biológico de invertebrados, incluindo ácaros, insetos e nematoides fitoparasitos, além de fungos causadores de doenças em plantas cultivadas, por meio

de fungos filamentosos antagonistas e, muitas vezes, multifuncionais, é um segmento que vem crescendo vertiginosamente nos últimos anos no Brasil e no mundo. Atualmente, o mercado brasileiro é referência mundial em liderança no desenvolvimento e em registros comerciais de biopesticidas à base de várias espécies de fungos filamentosos. Em virtude de sua ampla diversidade genética, adaptabilidade a vários ambientes edafoclimáticos, seguros para o ambiente e para humanos, múltiplos mecanismos de ação contra inúmeros alvos e, geralmente, facilmente cultivados em substratos sólidos ou líquidos, esses fungos são almejados pela indústria para uso como bioprotetores. Além disso, constituem uma ferramenta sustentável e, muitas vezes, indispensável em programas de manejo integrado de pragas e doenças de culturas agrícolas (Mascarin et al., 2019). Entre os fungos filamentosos mais explorados comercialmente no Brasil, até o momento, merecem destaque espécies pertencentes a *Metarhizium*, *Beauveria*, *Cordyceps*, *Trichoderma*, *Clonostachys*, *Pochonia* e *Purpureocillium*, as quais representam quase 40% de todos os produtos microbianos comercializados no país (Vicente, 2020).

A Embrapa Meio Ambiente vem liderando e colaborando em várias frentes de pesquisa com projetos em bioprospecção e seleção de isolados fúngicos elites com atributos fenotípicos desejados ao controle biológico e ao desempenho no sistema fabril, bem como tem buscado o aprimoramento do conhecimento em tecnologias que alavanquem a plataforma biotecnológica de fermentação líquida submersa ou sólida-estática até a etapa de formulação e estabilização de propágulos ativos desses fungos. Essa cadeia de etapas de desenvolvimento busca entregar uma solução tecnológica baseada num produto microbiano eficaz e com custo-benefício favorável à indústria.

Na linha de pesquisa que engloba os fungos entomopatogênicos, a Embrapa Meio Ambiente, em conjunto com outras instituições de pesquisa do Brasil e do exterior, e também em parceria com algumas empresas privadas, vem obtendo resultados promissores nas etapas de produção massal, formulação e eficácia de controle do alvo. Um importante destaque que quebrou o paradigma da produção massal baseada no tradicional método de fermentação sólida-estática foi o desenvolvimento de processos fermentativos sob cultivo submerso líquido em biorreatores que tornam possível a produção rápida e econômica de altas concentrações de células fúngicas denominadas de blastosporos para os fungos entomopatogênicos, como *Beauveria bassiana* (Mascarin et al., 2015a, 2015b; Jackson; Mascarin, 2016), *Cordyceps javanica* (Mascarin et al., 2015b; Corrêa et al., 2020) e *Metarhizium robertsii* (Iwanicki et al., 2020), bem como para produção de células de resistência denominadas micro-escleródios de *Trichoderma* spp. (Kobori et al., 2015; Jackson et al., 2016). Interessante ponderar que é natural deparar-se com uma grande variabilidade na resposta de desempenho mediante o processo fermentativo líquido entre cepas e espécies de fungos, o que implica a necessidade de desenvolver estudos de otimização mais direcio-

nados às exigências nutricionais e ambientais particulares das condições de cultivo de cada isolado fúngico, levando em consideração a morfofisiologia, a genética e o metabolismo do microrganismo. Por exemplo, a escolha da fonte de nitrogênio mais adequada ao crescimento do fungo é um dos critérios mais críticos no processo de otimização, pois impacta o desempenho produtivo e demais aspectos fenotípicos do propágulo (Mascarin et al., 2018).

Além da eficácia de blastosporos de *Metarhizium robertsii* no controle da cigarrinha do milho (*Dalbulus maidis*), seus microescleródios, aplicados via tratamento de sementes, foram capazes de induzir uma resposta de defesa da planta de milho, reduzindo o ataque da lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*), e ainda promoveram o crescimento das plantas (Lira et al., 2020). Sob cultivo submerso líquido, blastosporos de *Metarhizium robertsii* podem ser produzidos em apenas dois dias em biorreator e têm elevada tolerância à secagem, sem perder sua atividade inseticida (Iwanicki et al., 2020). Blastosporos de *Beauveria bassiana* e *Cordyceps javanica* mostraram-se altamente virulentos a ninfas de mosca branca (*Bemisia tabaci*) (Mascarin et al., 2015a, 2015b) e outras pragas da soja, tais como as lagartas *Chrysodeixis includens* e *Spodoptera frugiperda* (Correa et al., 2020). Em muitos casos, os blastosporos frescos, ou mesmo após passar por processo de secagem, apresentam alto índice de sobrevivência e mantêm-se virulentos ou com eficiência superior se comparada à de conídios aéreos. Os blastosporos são estruturas leveduriformes vegetativas que germinam mais rapidamente que os conídios e, por isso, apresentam uma vantagem em acelerar o processo de infecção no hospedeiro (Mascarin et al., 2015a, 2015b, 2016). Em estudo inédito, também se comprovou que blastosporos foram capazes de tolerar e sobreviver à secagem rápida em atomizador pela técnica de spray dryer, mantendo-se viáveis por mais de seis meses sob condições adequadas de empacotamento e armazenamento (Jackson; Mascarin, 2016; Mascarin et al., 2016). Nesse mesmo estudo, verificou-se que o empacotamento com atmosfera controlada, para redução de oxigênio e umidade dentro da embalagem, proporcionou maiores longevidade e estabilidade aos blastosporos secos de *Beauveria bassiana*, que sobreviveram por mais de 12 meses à temperatura de 28 °C.

No âmbito da pecuária, a Embrapa Meio Ambiente tem unido esforços com a Universidade de Goiás (UFG) e a Universidade Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) no sentido de desenhar uma estratégia sustentável de combate ao carrapato-do-boi (*Rhipicephalus microplus*) utilizando formulações granulares inéditas, contendo como ingrediente ativo microescleródios ou blastosporos de *Metarhizium robertsii*, obtidos por meio da fermentação líquida submersa. Nesse estudo, os grânulos de *Metarhizium robertsii* foram aplicados sobre a pastagem contendo fêmeas ingurgitadas do carrapato, as quais procuram o solo para colocar seus ovos depois que se alimentam do animal. O experimento foi conduzido ao longo de um ano, e verificou-se que a estra-

tégia resultou em pelo menos 64,8% de eficácia relativa durante estação mais úmida na redução da população desse carrapato (Marciano et al., 2021). Outra característica vantajosa dos microescleródios de *Metarhizium* spp. é sua resistência natural à radiação ultravioleta B (UV-B) relativamente superior à de conídios aéreos, o que indica que podem persistir por mais tempo no solo (Santos et al., 2021).

Outro destaque é a tecnologia desenvolvida para produzir e formular microescleródios de *Trichoderma* spp., os quais são mais tolerantes à secagem e têm maior tempo de prateleira que os conídios submersos ou aéreos (Kobori et al., 2015; Jackson et al., 2016). A formação dessa estrutura de resistência em *Trichoderma* é inédita sob condições de fermentação líquida submersa, e são propágulos ideais para o tratamento de sementes ou aplicação no solo. Os microescleródios de *Trichoderma harzianum* foram eficazes na supressão do tombamento causado por *Rhizoctonia solani* em melão (Kobori et al., 2015) e por *Sclerotinia sclerotiorum* em soja, além de serem compatíveis com o inoculante à base de *Bradyrhizobium japonicum* na soja e induzir crescimento mais vigoroso nas plantas após inoculação via tratamento de sementes (Macena et al., 2019).

Outros fungos de interesse industrial para uso como bioinsumos na agricultura e que, atualmente, apresentam dificuldades na produção pelo sistema de fermentação sólida-estática são *Clonostachys rosea* e os fungos nematófagos *Pochonia chlamydosporia* e *Purpureocillium lilacinum*, que têm sido temas recentes de pesquisa na Embrapa Meio Ambiente para adaptação e otimização da produção de biomassa ativa desses agentes de biocontrole via processo de fermentação líquida submersa, seguida da etapa de estabilização por diferentes processos de secagem associada à escolha da melhor formulação.

Por fim, é importante ressaltar que o domínio tecnológico dessas tecnologias de fermentação, formulação e estabilização de propágulos fúngicos vem demonstrando capacidade de atender a uma demanda da indústria de defensivos biológicos, que anseia pelo desenvolvimento de métodos mais eficientes, automatizados e de alta qualidade, atrelados ao bom custo-benefício, capazes de viabilizar economicamente a produção em larga escala desses fungos, utilizados no biocontrole de pragas e doenças.

### ***Clonostachys rosea* como agente de controle biológico**

*Clonostachys rosea* (Link: Fr.) Schroers, Samuels, Siefert and W. Gams [ex- *Gliocladium roseum*] (Schroers et al., 1999) é um fungo saprófita adaptado a diferentes ecossistemas, sendo encontrado em solos cultiváveis em regiões tropicais e até em florestas temperadas (Sutton et al., 1997). *Clonostachys rosea* produz conídios em conidióforos dos tipos “peniciliado” e “verticiliado” (Figura 17.1A). Nos peniciliados, os conídios são produzidos em longas cadeias sobre células conidiogênicas fialídicas, ao passo que

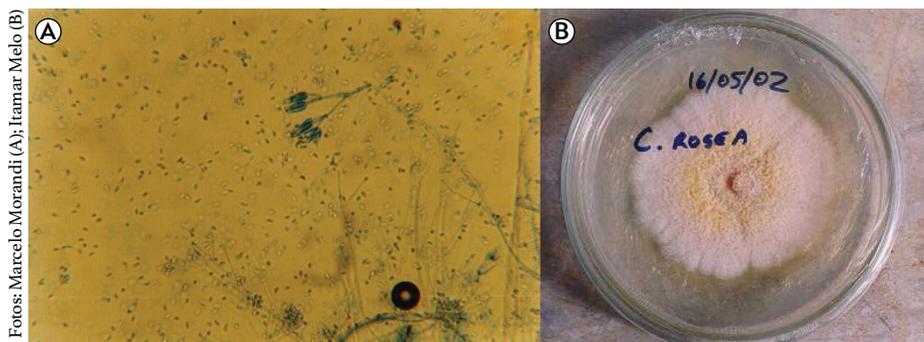
nos verticiliados se formam “gotas” de conídios envoltas por uma massa mucilaginosa. Em ambos os casos, os conídios são unicelulares, assimétricos, de parede fina e pequenos ( $5-7 \times 3-4 \mu\text{m}$ ). Em meio de cultura artificial, as colônias são geralmente esbranquiçadas, alaranjadas ou salmão (Figura 17.1B). A fase sexual (telomorfo) de *Clonostachys rosea* corresponde ao ascomiceto *Bionectria ochroleuca* (Schwein.) Berk. (Schroers et al., 1999).

*Clonostachys rosea* é um antagonista eficiente contra vários fitopatógenos, incluindo *Sclerotinia sclerotiorum*, *Magnaporthe grisea*, *Verticillium dahliae*, *Fusarium culmorum*, *Alternaria* spp., *Gibberella zeae* (Sutton et al., 1997; Thines et al., 1997; Jensen et al., 2004; Hue et al., 2009; Rodriguez et al., 2011; Saraiva et al., 2014) e *Botrytis cinerea* (Sutton et al., 1997; Morandi et al., 2001, 2003; Borges et al., 2015; Saraiva et al., 2015). Frequentemente, encontra-se *Clonostachys rosea* associado a nematoides no solo e a escleródios de diversos patógenos, como *Sclerotinia* spp., *Rhizoctonia solani* e *Botrytis* spp. (Walker; Maude, 1975; Whipps, 1987), assim como em tecidos senescentes de uma grande gama de plantas.

O hiperparasitismo e a competição por espaços e nutrientes são os principais mecanismos de antagonismo de *Clonostachys rosea* (Sutton et al., 1997; Morandi et al., 2001), além de produzir metabólitos secundários e enzimas hidrolíticas deletérios a fitopatógenos (Li et al., 2006; Rodriguez et al., 2011). Também induz o crescimento das plantas e a resistência contra patógenos (Mouekouba et al., 2014). O fungo foi relatado colonizando endofiticamente, sem expressão de sintomas, em diversas espécies de plantas, incluindo soja, morangueiro, tomateiro, framboesa e roseira, entre outras (Mueller; Sinclair, 1986; Sutton; Peng, 1993; Yu, 1996; Morandi et al., 2000a, 2000b; Sutton et al., 2002; Karlsson et al., 2015).

*Clonostachys rosea* atende, ainda, a vários requerimentos para um bom agente de controle biológico, como colonizar tecidos sem causar doença, ser um excelente competidor por substrato no solo, ser antagonista eficiente e permanecer efetivamente nos campos de infecção, ser de fácil multiplicação massal e desenvolver-se em ampla faixa de temperatura (10 a 30 °C) (Sutton et al., 1997; Morandi et al. 2001; Fravel, 2005; Nobre et al., 2005).

Os estudos com *C. rosea* na Embrapa Meio Ambiente começaram em 2001, inicialmente, com isolamento e seleção de cepas para o controle biológico do mofo cinzento, causado por *Botrytis cinerea*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Pythium* e outros patógenos (Morandi et al., 2005; Morandi; Costa, 2009; Corrêa et al., 2010; Fujinawa et al., 2020).



Fotos: Marcelo Morandi (A), Itamar Melo (B)

Figura 17.1. Conidióforos e conídios (A) e colônia em meio de cultura (B) de *Clonostachys rosea*.

Nos anos seguintes, vários aspectos da ecologia e dinâmica de sobrevivência de *Clonostachys rosea* e das interações do antagonista com o ambiente foram investigados (Morandi et al., 2006, 2008), servindo como um importante modelo de estudo dos efeitos do clima sobre o controle biológico de doenças de plantas. Entre esses estudos, destacam-se as avaliações do efeito da intensidade de radiação ultravioleta na sobrevivência e na efetividade do antagonista e a seleção de isolados tolerantes à UV (Costa et al., 2012, 2013, 2016).

Outra importante linha de pesquisa com *Clonostachys rosea* tem sido o aprimoramento da produção massal de esporos, condição essencial para o desenvolvimento de produtos comerciais. Nesse sentido, foram desenvolvidos métodos de fermentação sólida do antagonista em grãos de cereais como principal substrato e, mais recentemente, tem-se investido no desenvolvimento de processos de fermentação líquida (Carvalho et al., 2018, Maganhoto, 2020), a qual proporciona vantagens sobre a fermentação sólida, como redução dos custos dos substratos e da demanda por mão de obra, possibilidade de maior automação, redução de contaminação, encurtamento do período de fermentação e melhoria de controle das condições nutricionais e ambientais de produção dos propágulos do fungo. Assim, a fermentação líquida submersa é a alternativa mais promissora, pois promete reduzir o tempo de cultivo e aumentar os ganhos econômicos e de produção. Associado a essas facilidades, o cultivo submerso permite a obtenção de propágulos de interesse, tais como conídios submersos, blastosporos, micélio, clamidósporos e microescleródios.

Os sistemas de fermentação líquida e sólida proporcionam rendimentos economicamente viáveis e promissores que sustentam a produção comercial de *Clonostachys rosea*. A fermentação sólida em grãos de arroz apresentou uma concentração máxima de  $1,09 \times 10^9$  conídios/g após sete dias de cultivo, e na fermentação líquida a concentração chegou a  $2,28 \times 10^9$  conídios/mL após sete dias

em C:N = 50:1, além de uma indução na produção de microescleródios de  $1,66 \times 10^4$  mL após sete dias em meio C:N = 10:1, ambos suplementados com farelo de soja. Conídios submersos e *microescleródios* foram capazes de inibir em 100% a viabilidade de escleródios de *Sclerotinia sclerotiorum*. Portanto, esses resultados geram subsídios que fomentam o desenvolvimento de um bioproduto inédito à base de conídios submersos e/ou microescleródios de *Clonostachys rosea* para uso no manejo integrado de mofo branco e outros potenciais alvos (Silva et al., 2021).

### ***Trichoderma* spp. como agentes de controle biológico**

Espécies de *Trichoderma* são uma das mais importantes e mais frequentemente isoladas em solos, estando envolvidas na degradação de materiais lignocelulósicos. Esse fungo tem sido estudado intensamente com relação a várias características e aplicações na agricultura, como produtores de diversas enzimas. Mais recentemente, as enzimas celulolíticas têm merecido atenção, na medida em que são utilizadas na hidrólise da biomassa lignocelulósica para produção de etanol de segunda geração. *Trichoderma* spp. são exímias competidoras e colonizadoras de matéria orgânica e, uma vez estabelecidas no solo, lançam sua potente maquinaria enzimática. Espécies do gênero são caracterizadas por rápido crescimento e por apresentarem requisitos nutricionais simples. É um fungo que produz conidióforos altamente ramificados, com fiáldes dispostas nas pontas dos conidióforos (Figura 17.2A). Os conídios são produzidos nas terminações das fiáldes, onde se acumulam formando uma estrutura de cabeça conidiogênica (Figura 17.2B). Como todos os deuteromicetos, espécies de *Trichoderma* somente se reproduzem assexuadamente. No entanto, o gênero também tem um estágio sexual (teleomórfico) conhecido como *Hipocrea*, que é o ascomiceto da ordem *Hypocreales* (Samuels, 2006). Pela importância econômica desse fungo em processos industriais, três espécies de *Trichoderma* já têm seus genomas sequenciados e disponíveis: *T. reesei* (Martinez et al., 2008) *T. atroviride* e *T. virens*.

Algumas poucas, mas potentes espécies de *Trichoderma* têm sido utilizadas, em condições de campo, para controlar importantes doenças de plantas, constituindo um dos maiores mercados de produtos à base desse fungo para o biocontrole (Bettiol et al., 2019b). O grande potencial de *Trichoderma* como agente de controle biológico deve-se a um complexo conjunto de mecanismos e compostos, os quais incluem micoparasitismo, antibiose, competição por nutrientes e espaço, síntese de enzimas líticas, indução de resistência e promoção de crescimento (Monte et al., 2019). Micoparasitismo é a habilidade que *Trichoderma* spp. tem de parasitar patógenos filamentosos, como oomicetos e fungos (Harman; Shores, 2007) (Figura 17.2C). Esse processo inicia-se quando *Trichoderma* detecta a presença do fungo-alvo e cresce em sua direção (Chet et al., 1981). Esse direcionamento é ativado por sensoriamento remoto do fungo-alvo

por *Trichoderma* e deve-se, pelo menos em parte, à expressão sequencial de enzimas degradadoras de parede celular (CWDEs), como quitinases, gliconases/glicosidases e proteinases (Chet et al., 1998).

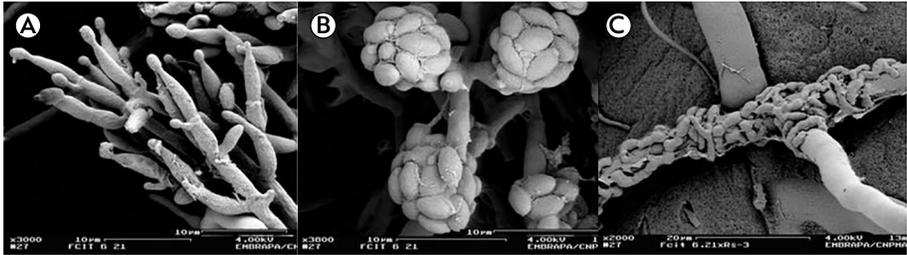
A ação de enzimas líticas, como glucanases, tem sido reportada como fundamental no processo de micoparasitismo. Em alguns casos, como para a espécie *T. virens*, curiosamente alguns antibióticos, como gliotoxina e peptaibols, agem sinergisticamente com enzimas líticas para aumentar a destruição das paredes celulares do hospedeiro (Di Pietro et al., 1993; Schirmböck et al., 1994). Além de micoparasitismo e antibiose, os fungos do gênero *Trichoderma* podem afetar fitopatógenos por competição por nutrientes e espaço (Chet, 1987), metabolização de exsudados indutores de germinação (Howell, 2003) e inibição de enzimas do patógeno necessárias para infecção (Zimand et al., 1996), os quais agregam força na capacidade que *Trichoderma* spp. têm de efetuar controle biológico de patógenos.

Espécies de *Trichoderma* contam com um enorme arsenal de síntese de mais de 100 substâncias bioativas, incluindo policetídeos, pironas, terpenos, antibióticos derivados de aminoácidos, peptaibols e polipeptídeos (Sivasithamparam; Ghisalberti, 1998), cujos perfis químicos têm sido utilizados como padrões quimiotaxonômicos.

Como agente de biocontrole, *T. harzianum* tem sido a espécie mais estudada, embora outras, como *T. asperellum*, *T. koningii*, *T. viride*, *T. hamatum*, *T. virens*, *T. stromaticum* e *T. pseudokoningii*, também venham sendo isoladas e analisadas com esse propósito. O sucesso maior com o uso de *Trichoderma* tem sido documentado para patógenos de solo, como: *Rhizoctonia solani*, *Sclerotium rolfsii*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Fusarium solani* e *Pythium* spp. (Benitez et al., 2004; Bettiol et al., 2019a, 2019b). Bettiol et al. (2019b) apresentam detalhes de 246 produtos comerciais à base de *Trichoderma* visando ao controle de doenças de plantas. Há relatos de controle das murchas de *Fusarium* e de *Verticillium* com espécies de *Trichoderma*, mas a eficácia do controle não tem sido consistente, pois esses fungos, uma vez que tenham penetrado o xilema, causam danos irreversíveis à planta hospedeira.

Estudos pioneiros de controle biológico de algumas doenças de solo no Brasil envolvendo *Trichoderma* foram desenvolvidos na Embrapa Meio Ambiente. À época, desenvolveram-se alguns biopesticidas à base de *Trichoderma* para o controle do mofo branco causado por *Sclerotinia sclerotiorum*, *Verticillium dahliae* e *Phytophthora citrophthora* (Cassiolato et al., 1996; Martins-Corder; Melo, 1998). Mais tarde, Amorim e Melo (1999) isolaram de solos supressivos à podridão radicular de citros causada por *Phytophthora citrophthora* e *P. parasitica*, em pomares de laranjas do estado de São Paulo, linhagens de *Trichoderma* capazes de reduzir o desenvolvimento da doença, Essas mesmas linhagens foram capazes de parasitar escleródios de *Rhizoctonia solani* (Melo; Faull, 2000). Ghini e Kimati (1989) utilizaram um método de isca para obtenção de isolados de *Trichoderma* antagonísticos a *Botrytis cinerea* de solos cultivados com

morango, selecionando isolados de *Trichoderma* resistentes a iprodione, com vistas ao controle integrado do patógeno na cultura do morango (Vitti; Ghini, 1989). Santos e Melo (1989) e Melo e Silva (1991) também estudaram a resistência de *Trichoderma* a fungicidas visando ao manejo integrado.



Fotos: Iliamar Soares de Melo

Figura 17.2. Eletromicrografia de fiálicas (A) e de massa conidiogênica (B) de *Trichoderma*; e linhagem de *Trichoderma* parasitando *Rhizoctonia solani* (C).

Um atributo importante de um agente de biocontrole é sua capacidade de colonizar e se estabelecer na rizosfera, de modo que possa ser capaz de controlar patógenos de raízes e de sementes. Há estudos mostrando que *Trichoderma* coloniza a rizosfera de algumas espécies de plantas, por ter a capacidade de metabolizar fontes de carbono orgânico, como celulose (Ahmad; Baker, 1988a, 1988b). Contradizendo esses achados, Melo et al. (1997) construíram mutantes de *Trichoderma* negativos na produção de celulases e inocularam em plantas. Os autores demonstraram que esses mutantes, negativos em hidrolisar celulose, colonizaram eficientemente a rizosfera e a endorizosfera.

*Trichoderma* tem sido relatado não somente como exímio agente de biocontrole, mas também como agente promotor do crescimento de plantas em diversas culturas agrícolas, incluindo soja (Bononi et al., 2020), milho (Harman et al., 2004), *Pinus* (Halifu et al., 2004) e repolho (Rabeendran et al., 2000), entre outras. Solubilização de fosfato e síntese de fito-hormônios, incluindo auxinas (Chowdappa et al., 2013) e ACC desaminase (Viterbo et al., 2010), são alguns dos mecanismos pelos quais algumas espécies de *Trichoderma* estimulam o crescimento de plantas. Bononi et al. (2020) isolaram e selecionaram linhagens de *Trichoderma* de solos da floresta amazônica capazes de solubilizar fosfato e promover o crescimento de plantas de soja. Os autores demonstraram que essas linhagens produziram ácidos orgânicos, como ácido glucônico, ácido cítrico, ácido málico, ácido ascórbico e ácido fítico como os principais responsáveis pela solubilização de fosfato. Essas linhagens de *Trichoderma* foram responsáveis por 41,4% da promoção do crescimento de soja.

Em 2005, a Embrapa Meio Ambiente selecionou um isolado de *Trichoderma asperellum*, em acordo com o Laboratório de Biocontrole Farroupilhas que deu origem ao

produto comercial Quality (Brasil, 2021). Recentemente, a Embrapa Meio Ambiente assinou um acordo com o IMAMt para desenvolvimento de dois produtos à base de *Trichoderma*, ambos em fase de registro. Também foi iniciado o desenvolvimento de um produto à base de *Trichoderma* com a empresa Ihara SA.

Biofungicidas à base de *Trichoderma* disponíveis comercialmente representam cerca de 60% do mercado mundial dos biofungicidas. É possível que esse mercado deva ser expandido à medida que novos produtos com características que garantam maior produtividade, com base em promotores de crescimento de plantas e que melhorem a tolerância a estresses abióticos, possam ser disponibilizados. No Brasil, em 2021, 37 produtos à base de *Trichoderma* estavam registrados (Brasil, 2021).

### ***Bacillus* como agente de controle biológico**

Espécies de *Bacillus* constituem o princípio ativo da maior parte dos produtos microbianos registrados no Brasil para controle de doenças de plantas (Brasil, 2021). Atualmente, no Brasil, são registrados produtos contendo as seguintes espécies de *Bacillus*: *Bacillus amyloliquefaciens*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus pumilus* e *Bacillus methylotrophicus*, sendo 31, 22, 6, 3 e 2 produtos registrados, respectivamente, de cada uma dessas espécies. Na Embrapa Meio Ambiente, os estudos com *Bacillus* como agente de controle biológico de doenças de plantas iniciaram-se em 1987, com os isolados obtidos por Bettiol (1988) em projeto de doutorado realizado na Esalq e financiado pela Fapesp. Desde 1987, foram realizados estudos com esses isolados de *Bacillus* spp. visando ao controle da podridão de frutos de banana (Bettiol et al., 1989); da ferrugem do cafeeiro (Bettiol; Varzea, 1992; Bettiol et al., 1994); da ferrugem do feijoeiro (Bettiol et al., 1992); de patógenos de sementes de feijão e trigo (Lazzaretti et al., 1994); da queima das folhas de inhame (Andrade et al., 1995); de *Pyricularia oryzae*, *Bipolaris sorokiniana* e *Alternaria tenuis* em sementes de trigo (Lazzaretti et al., 1995); para controlar patógenos em sementes de soja, arroz, trigo e feijão (Lazzaretti; Bettiol, 1997); de oídio do pepino da abobrinha (Bettiol et al., 1997); de *Puccinia psidii* (Santos et al., 1999); do bolor verde em frutos de laranja (Bernardo et al., 2008; Forner et al., 2013); da pinta-preta dos citros (Kupper et al., 2011); ferrugem da soja (Dorighello et al., 2015, 2020); podridão abacaxi em cana-de-açúcar (Brandi et al., 2018); murcha de *Fusarium* em tomateiro (Medeiros; Bettiol, 2021); entre outros. *Bacillus* spp. controla doenças de plantas por meio de antibiose, competição e indução de resistência (Cawoy et al., 2011). Além disso, promove crescimento das plantas (Cawoy et al., 2011; Medeiros; Bettiol, 2021). Essa versatilidade de *Bacillus* em controlar diversos fitopatógenos está diretamente relacionada com seus mecanismos de ação. Outra característica fundamental nesse grupo de organismos é a formação de endósporos, o que facilita a obtenção de formulações com uma vida de prateleira adequada para sua comercialização (Cawoy et al., 2011).

## Controle biológico na agricultura orgânica

Os sistemas orgânicos de produção buscam obter vantagens das interações de ocorrência natural, dando ênfase ao manejo das relações biológicas, como aquelas entre pragas e predadores, e em processos naturais, como a fixação biológica do nitrogênio no lugar do uso de métodos químicos. O objetivo é aumentar e sustentar as interações biológicas nas quais a produção agrícola está baseada, em vez de reduzir e simplificar essas interações (National Research Council, 1989). Assim, enfatiza-se o emprego de táticas e métodos – sejam eles culturais, mecânicos, físicos, legislativos, biológicos, de resistência genética etc. – com vistas à prevenção e à redução da intensidade das doenças. Nesse sentido, Mizubuti e Maffia (2001) definem o manejo ecológico de doenças de plantas como o “conjunto de estratégias e de práticas empregadas com base nos princípios de controle de doenças de plantas, com o objetivo de reduzir as perdas em níveis toleráveis, sem interferir, acentuadamente, no ambiente”.

Os princípios do controle biológico conservativo e aumentativo, os quais se referem, respectivamente, às ações que preservam ou protegem os antagonistas em seu próprio habitat e que favorecem o aumento de suas populações (Ehler, 1998), são largamente empregados na agricultura orgânica. Entretanto, o uso de produtos comerciais à base de agentes de controle biológico também tem aumentado, sendo estas duas estratégias empregadas de maneira convergente (Lucas; Sarniguet, 1998).

Nos sistemas agrícolas convencionais, o manejo de populações de pragas e de patógenos é, em geral, tratado isoladamente, com pouca consideração sobre o efeito das interações entre organismos infestantes e infectantes quanto à dinâmica de suas populações. Por outro lado, em sistemas nos quais o uso de pesticidas é restringido, a diversidade e a abundância de espécies de fitófagos e de patógenos são maiores, e as interações entre esses grupos de organismos podem afetar a dinâmica de suas populações (Paula Júnior et al., 2007). É com base nesse princípio que o uso de agentes biológicos e técnicas que promovam o aumento e a preservação destes nos sistemas produtivos orgânicos devem ser entendidos.

Um exemplo de manejo biológico integrado do ácaro-rajado *Tetranychus urticae* e do mofo-cinzento, causado pelo fungo *Botrytis cinerea*, no cultivo orgânico do morango é relatado por Morandi e Bettiol (2008). O sistema preconiza a aplicação do agente de biocontrole *Clonostachys rosea* em conjunto com a liberação de ácaros predadores *Phytoseiulus macropilis* e *Neoseiulus californicus*, associados ao correto manejo cultural da produção. Quando não controlado ou quando as estratégias de controle são empregadas de maneira incorreta, o ácaro-rajado pode reduzir em até 80% a produção de frutos (Ronque, 1999). Por sua vez, o mofo-cinzento causa perdas significativas pela podridão de frutos, tanto no campo quanto no pós-colheita (Ueno, 2004). A esporulação abundante do fungo nos restos culturais, principal fonte de inóculo, contribui

para a manutenção de epidemias. Morandi et al. (2000a, 2000b) relataram que a infestação do ácaro-rajado aumentou a germinação, o crescimento e a esporulação de *Botrytis cinerea*, demonstrando a importância do manejo integrado desses problemas. Além da aplicação dos agentes de controle biológico, a limpeza da cultura (sanitização) é mantida pela eliminação contínua de folhas e frutos doentes. Essa prática é de fundamental importância para a efetividade do manejo, como observado no campo, onde a interrupção da limpeza proporcionou aumento da incidência da doença mesmo com a aplicação do agente de biocontrole.

A produção de plantas medicinais representa uma alternativa inovadora e interessante para o agronegócio brasileiro (Lourenzani et al., 2004). Entretanto, com a domesticação e o melhoramento das plantas medicinais, visando à seleção de genótipos interessantes quanto a seus aspectos agronômicos e à composição química relacionada a sua atividade, torna-se quase inevitável o convívio com a ocorrência de pragas e doenças. Um dos desafios para o desenvolvimento dos fitoterápicos é o cultivo das plantas em larga escala, porém, de modo sustentável, sem comprometimento dos recursos naturais e preservando o ambiente (Vaz et al., 2006). Nesse contexto, o controle biológico é uma ferramenta indispensável.

A integração de métodos físicos e biológicos também foi eficiente no controle de perdas causadas por patógenos em um viveiro de *Cordia verbenacea* (erva-baleeira) (Morandi, 2009). A erva-baleeira é uma planta medicinal cujo óleo essencial é utilizado comercialmente na fabricação de pomadas e sprays com propriedades anti-inflamatórias. A propagação de mudas de *Cordia verbenacea* é feita em viveiros. As mudas podem ser obtidas a partir de sementes ou do enraizamento de estacas de ramos novos. Uma lavoura instalada de *Cordia verbenacea* fornece, após três anos, 16.000 kg/ha/ano de biomassa, o que é suficiente para a produção de 10 kg de óleo essencial. Com a seleção de melhores genótipos e a melhoria das técnicas de cultivo, pode-se chegar a 25 kg/ha/ano do óleo.

Em 2004, em um viveiro na região de Campinas (SP), identificou-se uma doença causada por *Phoma* sp. (Morandi, 2008). Os sintomas da doença são necrose das nervuras e estrangulamento das hastes, com formação de inúmeros picnídios. As perdas chegavam a mais de 60% das mudas no viveiro, e um primeiro teste verificou que o patógeno não estava sendo transmitido pelas sementes. Porém, os novos lotes de mudas eram rapidamente infectados ao serem colocados no viveiro. Para resolver o problema, foi proposto um esquema de manejo integrado (Figura 17.3) que incluiu, em sequência (as duas primeiras medidas visavam à redução do inóculo inicial do patógeno na área): a) limpeza e desinfestação das instalações do viveiro; b) desinfestação prévia do substrato em coletor solar (Ghini; Bettiol, 1991; Bettiol; Ghini, 2003); c) recolonização do substrato com aplicação de biofertilizante à base de esterco bovino, visando ao incremento da diversidade e atividade microbianas no substrato (Bettiol,

2006); d) manejo da irrigação, com redução da frequência e do ajuste da hora, para reduzir o período de molhamento foliar e, assim, limitar a ocorrência de ambiente favorável à infecção; e) proteção do filoplano, por meio da pulverização quinzenal de biofertilizante a 10%, visando à formação de uma “barreira biológica” sobre as mudas; e f) manutenção da limpeza, por meio da eliminação frequente de plantas e partes de plantas doentes, com vistas à redução da disseminação do inóculo secundário do patógeno no interior do viveiro. Com a aplicação dessas medidas, verificou-se redução drástica das perdas causadas pela doença para menos de 10% das mudas.

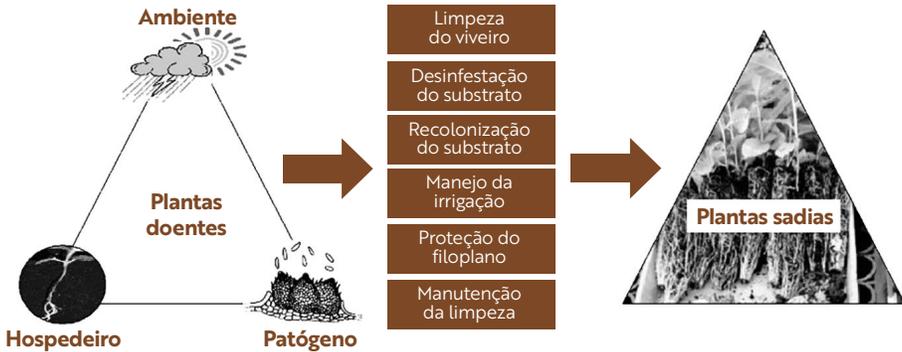


Figura 17.3. Esquema de manejo integrado de *Phoma* sp. em viveiro de erva-baleeira. Fonte: Adaptado de Morandi (2009).

O mercado brasileiro de agentes de controle biológico de doenças de plantas tem crescido e se diversificado significativamente nos últimos anos. A adoção do controle biológico na agricultura para controle dos problemas fitossanitários vem recebendo uma colaboração marcante da agricultura orgânica (Morandi et al., 2005).

A introdução de um agente de controle biológico exige seu estabelecimento, seguido da interação com o organismo-alvo e outras espécies de organismos. Essas complexas interações são fundamentais para o sucesso do controle, devendo ser analisadas de modo mais amplo e consideradas em longo prazo, e não em curto. Assim, é fundamental conhecer a ecologia de sistemas para o sucesso do controle biológico.

A integração de métodos biocompatíveis para o controle dos problemas fitossanitários torna-se ainda mais importante neste momento, com o desafio de mitigação e adaptação aos efeitos das mudanças climáticas. Assim, é imprescindível que esforços sejam envidados para minimizar a emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera, ao mesmo tempo que se aumenta a resiliência dos sistemas produtivos. A necessidade de se redesenharem os sistemas de produção para alcançar sua sustentabilidade já é reconhecida há algumas décadas (Bettiol; Ghini, 2003; Gliessman, 2005) e se torna ur-

gente (Masson-Delmotte et al., 2021). Os processos e produtos de base biológica terão papel fundamental nesse contexto.

## INDUÇÃO DE RESISTÊNCIA

### Bactérias do filoplano e indução de resistência

O uso de bactérias do filoplano como agentes de controle biológico é outra linha que vem sendo trabalhada na Embrapa Meio Ambiente. Um dos aspectos abordados é o uso de residentes da parte aérea, nativos da própria planta, para controle de doenças bacterianas. O filoplano é um ambiente que provém, basicamente, como substrato exsudatos excretados em sua superfície. Portanto, agentes de biocontrole capazes de se estabelecer em órgãos da parte aérea e exercer atividades antagonistas contam, essencialmente, com estes poucos recursos para manter suas colônias. Além disso, a incidência de radiação solar, mudanças rápidas no teor de umidade, entre outros fatores, fazem que a capacidade do bioagente em sobreviver e colonizar diferentes nichos constitua um desafio (Jacobs; Sundin, 2001; Bailey et al., 2006). A perspectiva na estratégia de seleção de microrganismos nativos é de que, uma vez que são provenientes do hospedeiro em que deverão atuar, estejam adaptados a essas condições. Esse aspecto foi explorado por Halfeld-Vieira et al. (2015). Nesse trabalho, a seleção de bioagentes baseada em seleção *in vivo* determinou quais aspectos são importantes para que uma bactéria de filoplano constitua um antagonista capaz de reduzir a severidade da mancha-bacteriana do maracujazeiro. Os mecanismos comuns aos agentes de biocontrole selecionados foram, essencialmente, a competição pelo íon ferro e por compostos nitrogenados. Posteriormente, demonstrou-se que a competição por ferro teve um papel na redução do número de colônias de *Xanthomonas axonopodis* pv. *passiflorae* no filoplano de plantas de maracujazeiro no decorrer do tempo, além de promover menor intensidade da doença (Ribeiro et al., 2017). Outras possibilidades, como antibiose e indução de resistência, que poderiam estar relacionadas, não foram relacionadas à capacidade de controle. Esse aspecto, além de prover novos bioagentes a serem utilizados oportunamente, auxilia em um direcionamento de estratégias de seleção de antagonistas e de possíveis meios capazes de interferir na disponibilidade de ferro no filoplano que possa ser utilizado pelo patógeno.

Em outra abordagem, explorou-se a capacidade de isolados de bactérias esporogênicas relacionadas ao gênero em controlar a mancha-bacteriana do tomateiro. A partir de um projeto conjunto entre Instituto Federal Goiano, Laboratório de Biocontrole Farroupilha e Embrapa Meio Ambiente, diferentes isolados foram submetidos a ensaios com a finalidade de desenvolvimento de um antagonista destinado ao controle

dessa doença. Também realizando seleção baseada em ensaios *in vitro*, verificou-se que um isolado de *Bacillus velezensis* GF267 demonstrou diversos atributos que explicavam sua capacidade de biocontrole (Mates et al., 2019). O isolado de *B. velezensis* GF267 apresentou múltiplas habilidades, como competição por íons Fe, fontes de carbono, além de antibiose, atributos importantes para antagonismo direto quando aplicado nas folhas. Em solo, verificou-se que o isolado incrementou as atividades de peroxidases e polifenoloxidasas, enzimas indicadoras do estado de indução de resistência – em ambas as situações, reduzindo significativamente a intensidade da mancha-bacteriana do tomateiro. Além desses aspectos, o aumento do teor de clorofila nas plantas colonizadas com tal agente de biocontrole indicou, também, a possibilidade de este contribuir para a promoção de crescimento das plantas. Um entrave, porém, foi que a indução de resistência, quando da aplicação do isolado no solo, promoveu resposta de curta duração. Mais recentemente, estudos com o mesmo patossistema foi conduzido em projeto de pesquisa na Embrapa Meio Ambiente, porém, com abordagem distinta. Uma vez que a indução de resistência eliciada por *B. velezensis* GF267 promoveu redução significativa da severidade da doença, com resultados animadores, explorou-se uma característica inata às plantas de responder com reação hipersensível a isolados de *Xanthomonas* spp. incompatíveis (Simões, 2020; Simões et al., 2021). Com base em um trabalho em que componentes de uma rizobactéria de controle biológico foram associados à capacidade de controlar doenças em *Arabidopsis*, feijoeiro e tomateiro (Meziane et al., 2005) por meio de indução de resistência, essa mesma hipótese foi testada com a finalidade de utilizar um bioinsumo para o controle de doenças bacterianas. Desta forma, foram extraídos e aplicados em tomateiros extratos brutos contendo lipopolissacarídeos e flagelos de isolados de diversas espécies de *Xanthomonas*, os quais promoveram reação hipersensível, aumentaram as atividades das enzimas indicadoras de indução de resistência e controlaram a mancha bacteriana por longos períodos. No momento, a viabilização do uso dessa tecnologia está sendo foco de trabalhos atuais para que possa, eventualmente, ser disponibilizada para produtores dessa cadeia produtiva.

## Fungos e indução de resistência

Em estudos com o objetivo de avaliar o efeito sistêmico de extratos etanólicos dos corpos de frutificação dos fungos *Ganoderma* e *Oudemansiella canarii* no controle do oídio do pepino, plantas de pepino cv. “Safira” foram pulverizadas com os dois extratos no primeiro estágio de crescimento da folha verdadeira e inoculados com *Sphaerotheca fuliginea* no segundo estágio de crescimento da folha. Os extratos de *Oudemansiella* e *Ganoderma* reduziram o número de colônias na folha secundária em 79% e 65%, e a taxa de esporulação, em 45% e 70%, respectivamente, bem como reduziram o diâmetro das colônias em 20% (Stadnik et al., 2003).

Na sequência, Stadnik e Bettiol (2007) estudaram a relação entre as alterações na atividade de lipoxigenase (LOX) e peroxidase (POX) e a proteção do pepino (*Cucumis sativus*) contra o oídio (*Podosphaera xanthii*) induzido por extratos hexânico e de acetato de etila de basidiocarpos de *Oudemansiella canarii*. No estágio de duas folhas, apenas as folhas primárias das plantas de pepino cultivadas em estufa foram pulverizadas com os extratos, sendo as folhas secundárias inoculadas um, quatro, sete ou dez dias após a pulverização dos extratos. O número de colônias de oídio foi avaliado seis dias após a inoculação, sendo as atividades de LOX e POX nas folhas secundárias determinadas 24 horas após cada momento da inoculação do patógeno. Stadnik e Bettiol (2007) observaram redução de 85% da doença quando as plantas foram inoculadas um dia depois da aplicação do extrato de hexano. Então, a redução da doença diminuiu no quarto dia, mas aumentou novamente quando as plantas foram inoculadas sete ou dez dias após o tratamento. A atividade LOX aumentou com a aplicação do extrato de hexano, mas não com o patógeno. A atividade da POX foi maior nas plantas inoculadas previamente tratadas com o extrato de hexano. Por outro lado, o extrato de acetato de etila não afetou a atividade enzimática, e sua eficácia de proteção diminuiu continuamente com o aumento do intervalo de tempo entre o tratamento e a inoculação.

## EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CONTROLE BIOLÓGICO

O controle biológico de doenças de plantas é resultado de uma interação entre hospedeiro, patógeno e uma variedade de não patógenos que repousam no sítio de infecção, sendo hospedeiro, patógeno e os demais organismos, além da própria interação, dependentes do ambiente. Assim, todos os tipos de controle biológico sofrerão interferências das mudanças climáticas (Bettiol, 2008; Bettiol; Ghini, 2009; Elad; Pertot, 2014). O equilíbrio biológico entre os organismos que vivem na rizosfera, filosfera, carposfera e espermosfera será alterado (Coakley et al., 1999) e, conseqüentemente, o controle biológico natural (Bettiol; Ghini, 2009). No controle biológico aumentativo, no qual os bioagentes são aplicados de maneira massal, a eficácia dos antagonistas varia de acordo com o ambiente (Bettiol; Ghini, 2009; Elad; Pertot, 2014), e a eficiência desses antagonistas deverá ser alterada pelas mudanças climáticas. Assim, no processo de isolamento e seleção de antagonistas, as previsões do clima futuro deverão ser consideradas durante todo o processo de desenvolvimento de um bioprotetor (Bettiol et al., 2012). Apesar da importância do tema, poucos estudos foram realizados sobre os efeitos das mudanças climáticas em agentes de biocontrole. Na Embrapa Meio Ambiente, em estudo que avaliou o efeito da elevação do CO<sub>2</sub> atmosférico sobre *Bacillus*

*subtilis*, *Bacillus pumilus* e *Lecanillium longisporum* no controle da ferrugem do cafeeiro, causada por *Hemileia vastatrix*, Mendes et al. (2012) verificaram que esses antagonistas não foram afetados pelas concentrações entre 380 e 1300 ppm de CO<sub>2</sub> atmosférico. Informações sobre os efeitos da radiação UV-B sobre *Lecanicillium* spp. e *Clonostachys rosea* são apresentados no capítulo sobre mudanças climáticas ou podem ser consultadas em Galvão e Bettiol (2014) e Costa et al. (2012, 2013, 2016). Outros aspectos relacionados aos efeitos das mudanças climáticas sobre o controle biológico de doenças de plantas são discutidos por Ghini et al. (2008, 2011, 2012).

## CONTROLE DE QUALIDADE DE AGENTES DE BIOCONTROLE DE DOENÇAS DE PLANTAS

O controle de qualidade em todas as etapas da cadeia de produção de um agente de biocontrole é extremamente importante para que produtos de reconhecida qualidade sejam disponibilizados no mercado e, assim, manter a confiança dos agricultores sobre a eficácia dos bioprodutos. Consequentemente, contribuirá para ampliar o mercado de agentes de biocontrole para o manejo integrado de doenças e pragas de plantas (Pinto et al., 2019).

Considerando os problemas existentes com a qualidade dos produtos contendo agentes de biocontrole comercializados, bem como a inexistência, no Brasil, de metodologias padronizadas, em 2008 formou-se uma rede de pesquisa chamada de Projeto Qualibio (Desenvolvimento de metodologia analítica e amostral para avaliação de conformidade e da inocuidade de produtos comerciais formulados à base de agentes microbianos), a qual desenvolveu metodologias para avaliar a conformidade e a qualidade de produtos comerciais formulados à base de agentes microbianos para o controle de doenças de plantas. O projeto foi financiado pelo edital MCT/CNPq/Mapa/DAS nº 64/2008, com coordenação da Embrapa Meio Ambiente e participação da Embrapa Arroz e Feijão, do Instituto Biológico de São Paulo, da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, da Universidade Federal de Pelotas e da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (Ceplac/Cefet).

As metodologias desenvolvidas no âmbito do Projeto Qualibio são utilizadas por praticamente todas as empresas, laboratórios e instituições de pesquisa para avaliar a conformidade e a qualidade de produtos comerciais formulados à base de agentes microbianos para controle de doenças de plantas, além de pesquisas na área. As metodologias foram desenvolvidas para produtos à base de fungos do gênero *Trichoderma* e bactérias do gênero *Bacillus*. Contudo, podem ser utilizadas para outros microrganismos antagonistas, como *Clonostachys rosea*, *Pochonia clamydosporea*, *Purpureocillium lilacinum*, entre outros, e, também, para outras bactérias, desde que consideradas as

especificidades de cada espécie. Detalhes das metodologias podem ser obtidos em Pinto et al. (2019), Bettiol et al. (2012) e Qualibio (2012).

No Projeto Qualibio também foi desenvolvida uma ferramenta computacional, intitulada Calibra, para a realização de contagem de esporos, calibração de suspensão e inóculo e armazenamento de dados, visando ao controle de qualidade dos produtos (Santos et al., 2011).

## DIVULGAÇÃO DO CONTROLE BIOLÓGICO E FORMAÇÃO DE PESSOAS

Desde o primeiro livro, intitulado Controle biológico de doenças de plantas, foram mais nove livros da área publicados pela Embrapa Meio Ambiente. Além disso, os pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente publicaram 74 capítulos de livros sobre controle biológico de doenças de plantas. Em conjunto, os pesquisadores Bernardo Almeida Halfeld Vieira, Itamar Soares de Melo, Raquel Ghini e Wagner Bettiol orientaram 42 dissertações de mestrado e 44 teses de doutorado envolvendo os diferentes tipos de controle biológico de doenças de plantas junto à Universidade de São Paulo, à Universidade Estadual Paulista (Unesp), à Universidade Federal de Lavras (Ufla) e à Universidade Federal de Roraima (UFRR). Todas as teses e dissertações estão disponíveis tanto nas respectivas universidades quanto no Sistema Embrapa de Bibliotecas. O número de bolsistas de iniciação científica que trabalharam com controle biológico no Laboratório de Microbiologia Ambiental “Raquel Ghini” é superior a 200. Além disso, foram supervisionados muitos pós-doutorandos.

## POLÍTICAS PÚBLICAS

Detalhes sobre a atuação da Embrapa Meio Ambiente em políticas públicas são discutidos no Capítulo 28. Contudo, é fundamental incluir aqui três informações. A primeira diz respeito ao papel primordial da Embrapa Meio Ambiente no estabelecimento do sistema de etapas para avaliação de produtos considerados de baixas toxicidade e periculosidade (Portaria Normativa Ibama nº 131/97 – Ibama, 1997). Essa portaria teve como base as publicações de De Nardo et al. (1995a, 1995b), originárias de eventos realizados na unidade. A segunda foi a criação da Associação Brasileira das Empresas de Biocontrole (ABC BIO). Resumidamente, em outubro de 2007, no âmbito do Fórum Permanente de Adequação Fitossanitária da Embrapa Meio Ambiente, foi criada a ABC BIO para organizar o setor no país. Atualmente, a ABC BIO foi agregada à CropLife Brasil, e praticamente todas as empresas de controle biológico no país são associadas. A terceira foi a organização em conjunto entre a Embrapa

Meio Ambiente, por meio do Fórum Permanente de Adequação Fitossanitária, e o Mapa de um workshop sobre “As vantagens de registro dos produtos biológicos para o controle de doenças e pragas” (Bettiol et al., 2014). Essas ações colaboraram para a elaboração de diversas normas técnicas pelo Mapa, resultando no aumento do número de produtos biológicos registrados no Brasil.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos cinco anos (2018 a 2022), a taxa anual composta de crescimento (CAGR) do mercado brasileiro de biopesticidas registrados foi de 45%. A Embrapa Meio Ambiente precisa comemorar este número, pois vem participando ativamente do desenvolvimento de pesquisas em controle biológico de doenças de plantas desde 1986. As atividades da Embrapa Meio Ambiente em controle biológico de doenças de plantas não foi e não é apenas em pesquisa, mas também sempre envolveu forte atuação no estabelecimento de políticas públicas, em treinamento (com mais de 200 estudantes treinados no Laboratório de Microbiologia Ambiental “Raquel Ghini”), na divulgação do controle biológico (mais de 10 livros e, aproximadamente, 100 capítulos de livros publicados sobre o tema e mais de 300 artigos científicos publicados em renomados periódicos) e na disponibilização de organismos para serem utilizados na agricultura brasileira. Estes números colocam a Embrapa Meio Ambiente na linha de frente das instituições de pesquisa que desenvolvem controle biológico de doenças de plantas no Brasil.

## REFERÊNCIAS

- AHMAD, J. S.; BAKER, R. Growth of rhizosphere-competent mutants of *Trichoderma harzianum* on carbon substrates. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 34, n. 6, p. 807-814, 1988a.
- AHMAD, J. S.; BAKER, R. Implication of rhizosphere competence of *Trichoderma harzianum*. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 34, n. 3, p. 229-234, 1988b.
- AMORIM, E. P. R.; MELO, I. S. de. Efeito da associação de antagonistas no controle de *Phytophthora parasitica* e *P. citrophthora* em plântulas de citros. **Summa Phytopathologica**, v. 25, n. 4, p. 335-338, 1999.
- ANDRADE, D. E. G.; SILVA, E. B.; MICHEREFF, S. J.; MARIANO, R. L. R.; BETTIOL, W. Controle da queima das folhas de inhame com produtos à base de *Bacillus subtilis*. **Summa Phytopathologica**, v. 21, n. 3/4, p. 202-205, 1995.
- ARAÚJO, F. F.; BETTIOL, W. Efeito de lodo de esgoto sobre patógenos habitantes do solo e severidade de oídio da soja. **Summa Phytopathologica**, v. 35, n. 3, p. 184-190, 2009.
- ARAÚJO, F. F.; BETTIOL, W. Supressividade dos nematóides *Meloydogine javanica* e *Heterodera glycines* em soja por adição de lodo de esgoto ao solo. **Ciência Rural**, v. 35, n. 4, p. 806-812, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000400009>.
- BAILEY, M. J.; LILLEY, A. K.; TIMMS-WILSON, T. M.; SPENCER-PHILLIPS, P. T. N. (Eds.) **Microbial ecology of aerial plant surfaces**. CABI: Wallingford, 2006. 321 p. DOI: <http://doi.org/10.1079/9781845930615.0000>.
- BENÍTEZ, T.; RINCÓN, A. M.; LIMÓN, M. C.; CODON, A. C. Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains. **International Microbiology**, v. 7, n. 4, p. 249-260, 2004.
- BERNARDO, E. R. A.; ZUCCHI, T. D.; BETTIOL, W. Biological control of *Penicillium digitatum* on organic orange fruits in postharvest. In: TALLER URUGUAYO DE AGENTES MICROBIANOS DE CONTROL BIOLOGICO, 2., 2008, Colonia, Uruguai. **Anales... La Estanzuela: INIA**, 2008. p. 27.
- BETTIOL, W. Effect of sewage sludge on the incidence of corn stalk rot caused by Fusarium. **Summa Phytopathologica**, v. 30, n. 1, p. 16-22, 2004.
- BETTIOL, W. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre o controle biológico de doenças de plantas. In: GHINI, R.; HAMADA, E. (ed.). **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2008. p. 299-321.
- BETTIOL, W. Productos alternativos para el manejo de enfermedades em cultivos comerciales. **Fitosanidad**, v. 10, n. 2, p. 85-98, 2006.
- BETTIOL, W. Seleção de microrganismos antagonísticos a *Pyricularia oryzae* Cav. para o controle da brusone do arroz (*Oryza sativa* L.). 1988. 140 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- BETTIOL, W.; BRANDÃO, M. S. B.; SAITO, M. L. Controle da ferrugem do feijoeiro com extratos e células formuladas de *Bacillus subtilis*. **Summa Phytopathologica**, v. 18, n. 2, p. 153-159, 1992.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (ed.). **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 312 p.

BETTIOL, W.; FORNER, C.; MATTOS, L. P. V. Development of suppressiveness to *Fusarium oxysporum* in container media and soil amended with fish emulsion and fish hydrolyzed. *Acta Horticulturae*, v. 1044, p. 133-138, 2014.

BETTIOL, W.; GARIBALDI, A.; MIGHELI, Q. *Bacillus subtilis* for the control of powdery mildew on cucumber and zucchini squash. *Bragantia*, v. 56, n. 2, p. 281-287, 1997.

BETTIOL, W.; GHINI, R. Impactos das mudanças climáticas sobre o controle biológico de doenças de plantas. In: BETTIOL, W.; MORANDI, M. A. B. (ed.). **Biocontrole de doenças de plantas: uso e perspectivas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2009. p. 29-48.

BETTIOL, W.; GHINI, R. Impacts of sewage sludge in tropical soil: a case study in Brazil. *Applied and Environmental Soil Science*, v. 2011, article 212807, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1155/2011/212807>.

BETTIOL, W.; GHINI, R. Proteção de plantas em sistemas agrícolas alternativos. In: CAMPANHOLA, C.; BETTIOL, W. (ed.). **Métodos alternativos de controle fitossanitário**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2003. p. 79-95.

BETTIOL, W.; GHINI, R. Solos supressivos. In: MICHEREFF, S. J.; ANDRADE, D. E. G. T.; MENEZES, M. (ed.). **Ecologia e manejo de patógenos radiculares em solos tropicais**. Recife: UFRPE, 2005. p. 124-152.

BETTIOL, W.; GHINI, R.; MARIANO, R. L. R.; MICHEREFF, S. J.; MATTOS, L. P. V.; ALVARADO, I. C. M.; PINTO, Z. V. Supressividade a fitopatógenos habitantes do solo. In: BETTIOL, W.; MORANDI, M. A. B. (ed.). **Biocontrole de doenças de plantas: uso e perspectivas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2009. p. 187-208.

BETTIOL, W.; GHINI, R.; MOSCA, J. L. Efeito de *Bacillus subtilis* no controle da podridão de frutos de banana causada por *Colletotrichum musae*. *Fitopatologia Brasileira*, v. 14, n. 2, p. 132, 1989.

BETTIOL, W.; KRUGNER, T. L. Influência do lodo de esgoto na severidade da podridão de raiz do sorgo causada por *Pythium arrhenomanes*. *Summa Phytopathologica*, v. 10, n. 3, p. 243-251, 1984.

BETTIOL, W.; MAFFIA, L. A.; CASTRO, M. L. M. P. Controle biológico de enfermidades de plantas em Brasil. In: BETTIOL, W.; RIVERA, M. C.; MONDINO, P.; MONTEALEGRE, J. R.; COLMENÁREZ, Y. (Ed.). **Control biológico de enfermidades de plantas en América Latina y el Caribe**. Montevideo: Facultad de Agronomía, Universidad de la República, 2014. p. 91-138.

BETTIOL, W.; MATTOS, L. P. V. Biological control of postharvest green mould (*Penicillium digitatum*) of oranges by yeasts and bacteria. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF POSTHARVEST PATHOLOGY/DISEASE CONTROL, 2011, Lleida. **Book of abstracts...** Lleida: Universitat de Lleida, 2011. Resumo P5.

BETTIOL, W.; MIGHELI, Q.; GARIBALDI, A. Controle, com matéria orgânica, do tombamento do pepino, causado por *Pythium ultimum* Trow. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 32, n. 1, p. 57-61, 1997.

BETTIOL, W.; MORANDI, M. A. B.; PINTO, Z. V.; PAULA JÚNIOR, T. J.; MOURA, A. B.; LUCON, C. M. M.; COSTA, J. C. B.; BEZERRA, J. L. **Avaliação da qualidade de produtos à**

- base de *Trichoderma*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2012. Apostila. Disponível em: [https://www.cnpma.embrapa.br/down\\_site/forum/2012/trichoderma/Apostila\\_Trichoderma\\_2012.pdf](https://www.cnpma.embrapa.br/down_site/forum/2012/trichoderma/Apostila_Trichoderma_2012.pdf). Acesso em: 15 jul. 2021.
- BETTIOL, W.; SAITO, M. L.; BRANDÃO, M. S. B. Controle da ferrugem do cafeeiro com produtos à base de *Bacillus subtilis*. *Summa Phytopathologica*, v. 20, n. 2, p. 119-122, 1994.
- BETTIOL, W.; SILVA, J. C.; CASTRO, M. L. M. P. de. Uso atual e perspectivas do *Trichoderma* no Brasil In: MEYER, M. C.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. da (ed.). *Trichoderma*: uso na agricultura. Brasília, DF: Embrapa, 2019a. pt. 1. cap. 1. p. 21-43.
- BETTIOL, W.; PINTO, Z. V.; SILVA, J. C.; FORNER, C.; FARIA, M. R. de; PACIFICO, M. G.; COSTA, L. S. A. S. Produtos comerciais à base de *Trichoderma*. In: MEYER, M. C.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. da (Ed.). *Trichoderma*: uso na agricultura. Brasília, DF: Embrapa, 2019b. pt. 1. cap. 2. p. 45-160.
- BETTIOL, W.; VARZEA, V. M. P. Controle biológico da ferrugem (*Hemileia vastatrix*) do cafeeiro com *Bacillus subtilis* em condições controladas. *Fitopatologia Brasileira*, v. 17, n. 1, p. 91-95, 1992.
- BETTIOL, W.; VISCONTI, A. Development of suppressiveness to root rot caused by *Cylindrocladium spathiphylli* in container media amended with marine residues. *IOBC Bulletin*, v. 86, p. 241-245, 2013.
- BISSETT, J.; GAMS, W.; JAKLITSCH, W.; SAMUELS, G. J. Accepted *Trichoderma* names in the year 2015. *IMA Fungus*, v. 6, n. 2, p. 263-295, 2015.
- BONANOMI, G.; ANTIGNANI, V.; CAPODILUPO, M.; SCALA, F. Identifying the characteristics of organic soil amendments that suppress soilborne plant diseases. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 42, n. 2, p. 136-144, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.10.012>.
- BONANOMI, G.; GAGLIONE, S. A.; CESARANO, G.; SARKER, T. C.; PASCALE, M.; SCALA, F.; ZOINA, A. Frequent applications of organic matter to agricultural soil increase fungistasis. *Pedosphere*, v. 27, n. 1, p. 86-95, 2017. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60298-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60298-4).
- BONANOMI, G.; LORITO, M.; VINALE, F.; WOO, S. L. Organic amendments, beneficial microbes, and soil microbiota: toward a unified framework for disease suppression. *Annual Review of Phytopathology*, v. 56, p. 1-20, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080615-100046>.
- BONANOMI, G.; ZOTTI, M.; IDBELLA, M.; DI SILVERIO, N.; CARRINO, L.; CESARANO, G.; ASSAEED, A. M.; ABD-ELGAWAD, A. M. Decomposition and organic amendments chemistry explain contrasting effects on plant growth promotion and suppression of *Rhizoctonia solani* damping off. *PLoS ONE*, v. 15, n. 4, e0230925, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230925>.
- BONONI, L.; CHIARAMONTE, J. B.; PANSA, C. C.; MOITINHO, M. A.; MELO, I. S. de. Phosphorus-solubilizing *Trichoderma* spp. from Amazon soils improve soybean plant growth. *Science Report*, v. 10, article 2858, 2020.
- BORGES, Á. V.; SARAIVA, R. M.; MAFFIA, L. A. Biocontrol of gray mold in tomato plants by *Clonostachys rosea*. *Tropical Plant Pathology*, v. 40, n. 2, p. 71-76, 2015.

- BORRERO, C.; ORDOVÁS, J.; TRILLAS, M. I.; AVILES, M. Tomato Fusarium wilt suppressiveness: the relationship between the organic plant growth media and their microbial communities as characterised by Biolog (R). *Soil Biology & Biochemistry*, v. 38, n. 7, p. 1631-1637, 2006.
- BRANDI, F.; HECK, D. W.; FERREIRA, T. C.; BETTIOL, W. Commercial formulations of *Bacillus* spp. for sugarcane pineapple disease control and growth promotion. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 53, n. 12, p. 1311-1319, 2018.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agrofit**. Disponível em: [http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit\\_cons/principal\\_agrofit\\_cons](http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons). Acesso em: 15 ago. 2021.
- BUENO, V. H. P.; PARRA, J. R. P.; BETTIOL, W.; LENTEREN, J. C. van. Biological control in Brazil. In: LENTEREN, J. C. van; BUENO, V. H. P.; LUNA, M. G.; COLMENAREZ, Y. C. (ed.). **Biological control in Latin America and the Caribbean: its rich history and bright future**. Boston, MA: CAB International, 2020. p. 78-107. (CABI invasive series; 12). DOI: <https://doi.org/10.1079/9781789242430.0000>.
- CARRIÓN, V. J.; PEREZ-JARAMILLO, J. E.; CORDOVEZ, V.; TRACANNA, V.; HOLLANDER, M. de; RUIZ-BUCK, D.; MENDES, L. W.; IJCKEN, W. F. J. van; GOMEZ-EXPOSITO, R.; ELSAYED, S. S.; MOHANRAJU, P.; ARIFAH, A.; OOST, J. van der; PAULSON, J. N.; MENDES, R.; WEZEL, G. P. van; MEDEMA, M. H.; RAAIJMAKERS, J. M. Pathogen-induced activation of disease-suppressive functions in the endophytic root microbiome. *Science*, v. 366, n. 6465, p. 606-612, 2019.
- CARVALHO, A. L. de A.; REZENDE, L. C. de; COSTA, L. B.; HALFELD-VIEIRA, B. de A.; PINTO, Z. V.; MORANDI, M. A. B.; MEDEIROS, F. H. V.; BETTIOL, W. Optimizing the mass production of *Clonostachys rosea* by liquid-state fermentation. *Biological Control*, v. 118, p. 16-25, 2018.
- CASSIOLATO, A. M. R.; BAKER, R. MELO, I. S. de. Parasitismo de *Sclerotinia sclerotiorum* e *S. minor* por mutantes de *Trichoderma harzianum* em segmentos de aipo. *Fitopatologia Brasileira*, v. 21, n. 1, p. 120-122, 1996.
- CAWOY, H.; BETTIOL, W.; FICKERS, P.; ONGENA, M. *Bacillus*-based biological control of plant diseases. In: STOYTICHEVA, M. (ed.). **Pesticides in the modern world: pesticides use and management**. Rijeka: InTech, 2011. p. 273-302.
- CHAPELLE, E.; MENDES, R.; BAKKER, P. A. H. M.; RAAIJMAKERS, J. M. Fungal invasion of the rhizosphere microbiome. *ISME Journal*, v. 10, n. 1, p. 265-268, 2015.
- CHEN, W.; HOITINK, H. A. J.; SCHMITTHENNER, A. F. Factors affecting suppression of *Pythium* damping-off in container media amended with composts. *Phytopathology*, v. 77, n. 5, p. 755-760, 1987.
- CHET, I. *Trichoderma*: application, mode of action and potential as a biocontrol agent of soil borne plant pathogenic fungi. In: CHET, I. (ed.). **Innovative approaches to plant disease control**. New York: J. Wiley, 1987. p. 137-160.
- CHET, I.; BENHAMOU, N.; HARAN, S. Mycoparasitism and lytic enzymes. In: HARMAN, G. E.; KUBICEK, P. (ed.). **Trichoderma and Gliocladium**. London: Taylor and Francis, 1998. v. 2, p. 153-172.
- CHET, I.; HARMAN, G. E.; BAKER, R. *Trichoderma hamatum*: its hyphal interactions with *Rhizoctonia solani* and *Pythium* spp. *Microbial Ecology*, v. 7, n. 1, p. 29-38, 1981.

- CHOWDAPPA, P.; KUMAR, S. P. M.; LAKSHMI, M. J.; UPRETI, K. K. Growth stimulation and induction of systemic resistance in tomato against early and late blight by *Bacillus subtilis* OTPB1 or *Trichoderma harzianum* OTPB3. **Biological Control**, v. 65, n. 1, p. 109-117, 2013.
- COAKLEY, S. M.; SCHERM, H.; CHAKRABORTY, S. Climate change and plant disease management. **Annual Review of Phytopathology**, v. 37, p. 399-426, 1999.
- CORRÊA, E. B.; BETTIOL, W.; MORANDI, M. A. B. Controle biológico da podridão de raiz causada por *Pythium aphanidermatum* e promoção de crescimento de alface hidropônica com *Clonostachys rosea*. **Tropical Plant Pathology**, v. 35, n. 4, p. 248-252, 2010.
- CORRÊA, B.; DUARTE, V. S.; SILVA, D. M.; MASCARIN, G. M.; DELALIBERA JÚNIOR, I. Comparative analysis of blastospore production and virulence of *Beauveria bassiana* and *Cordyceps fumosorosea* against soybean pests. **BioControl**, v. 65, n. 3, p. 323-337, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10526-020-09999-6>.
- CORRÊA, E. B.; GALVÃO, J. A. H.; BETTIOL, W. Controle biológico da podridão radicular e promoção de crescimento em pepino hidropônico com microrganismos de manguezais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 2, p. 130-136, 2011.
- COSTA, L. B.; MORANDI, M. A. B.; STRICKER, S. M.; BETTIOL, W. UV-B radiation reduces biocontrol ability of *Clonostachys rosea* against *Botrytis cinerea*. **Biocontrol Science and Technology**, v. 26, n. 12, p. 1736-1749, 2016.
- COSTA, L. B.; RANGEL, D. E. N.; MORANDI, M. A. B.; BETTIOL, W. Effects of UV-B radiation on the antagonistic ability of *Clonostachys rosea* to *Botrytis cinerea* on strawberry leaves. **Biological Control**, v. 65, n. 1, p. 95-100, 2013.
- COSTA, L. B.; RANGEL, D. E. N.; MORANDI, M. A. B.; BETTIOL, W. Impact of UV-B radiation on *Clonostachys rosea* germination and growth. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 28, n. 7, p. 2497-2504, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-012-1057-7>.
- COTES, A. M.; FARGETTON, X.; KÖHN, J. Diseño conceptual, selección y prueba de concepto de microorganismos biocontroladores. In COTES, A. M. (ed.). **Control biológico de fitopatógenos, insectos y ácaro**. Mosquera: AGROSAVIA, 2019. v. 2, p. 598-627.
- CRAFT, C. M.; NELSON, E. B. Microbial properties of composts that suppress damping-off and root rot of creeping bentgrass caused by *Pythium graminicola*. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 62, n. 5, p. 1550-1557, 1996.
- DISSANAYAKE, N.; HOY, J. W. Organic material soil amendment effects on root rot and sugarcane growth and characterization of the materials. **Plant Disease**, v. 83, n. 11, p. 1039-1046, 1999.
- COTXARRERA, L.; TRILLAS-GAY, M. I.; STEINBERG, C.; ALABOUVETTE, C. Use of sewage sludge compost and *Trichoderma asperellum* isolates to suppress Fusarium wilt of tomato. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 34, n. 4, p. 467-476, 2002.
- DE NARDO, E. A. B.; CAPALBO, D. M. F.; MORAES, G. J. de; OLIVEIRA, M. C. B. (coord.). **Requisitos para a análise de risco de produtos contendo agentes microbianos de controle de organismos nocivos: uma proposta para os órgãos federais registrantes**. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1995a. 42 p. EMBRAPA-CNPMA. Documentos, 2).

DE NARDO, E. A. B.; CAPALBO, D. M. F.; OLIVEIRA, M. C. B. de; MORAES, G. J. de (ed.). **Análise de risco e avaliação do impacto ambiental decorrente do uso de agentes de controle biológico**: memória do workshop. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1995b. 127 p. (EMBRAPA-CNPMA. Documentos).

DI PIETRO, A.; LORITO, M.; HAYES, C.; BROADWAY, K.; HARMAN, G. E. Endochitinase from *Gliocladium virens*. Isolation, characterization, synergistic antifungal activity in combination with gliotoxin. **Phytopathology**, v. 83, n. 3, p. 308-313, 1993.

DORIGHELLO, D. V.; BETTIOL, W.; MAIA, N. B.; LEITE, R. M. V. B. de C. Controlling Asian soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) with *Bacillus* spp. and coffee oil. **Crop Protection**, v. 67, p. 59-65, Jan. 2015.

DORIGHELLO, D. V.; FORNER, C.; LEITE, R. M. V. B. de C.; BETTIOL, W. Management of Asian soybean rust with *Bacillus subtilis* in sequential and alternating fungicide applications. **Australasian Plant Pathology**, v. 49, n. 1, p. 79-86, 2020.

DROBY, S.; WISNIEWSKI, M.; MACARISIN, D.; WILSON, C. Twenty years of postharvest biocontrol research: is it time for a new paradigm? **Postharvest Biology and Technology**, v. 52, n. 2, p. 137-145, 2009.

EHLER, L. E. Conservation biological control: Past, present and future. In: BARBOSA, P. (ed.). **Conservation biological control**. San Diego: Academic Press, 1998. p. 1-8.

ELAD, Y.; PERTOT, I. Climate change impacts on plant pathogens and plant diseases. **Journal of Crop Improvement**, v. 28, p. 99-139, 2014.

FARIA, M. R. de; GUIMARÃES, R. A.; PINTO, F. A. M. F.; SIQUEIRA, C. da S.; SILVA, C. A.; MEDEIROS, F. H. V.; BETTIOL, W. Contribution of organic amendments to soil properties and survival of *Stenocarpella* on maize stalk. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 6, e20180033, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2018-0289>.

FORNER, C.; BETTIOL, W.; NASCIMENTO, L. M.; TERAPO, D. Controle em pós-colheita de *Penicillium digitatum* em laranja-pêra com microorganismo e tratamento térmico. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 35, n. 1, p. 23-31, 2013.

FRAVEL, D. R. Commercialization and implementation of biocontrol. **Annual Review of Phytopathology**, v. 43, p. 337-59, 2005.

FRAGA, A. Mercado de biológicos vai quase triplicar no Brasil em 2030 e atingir R\$ 3,7 bilhões. Disponível em: <https://globorural.globo.com/Noticias/Agricultura/noticia/2021/04/mercado-de-biologicos-vai-quase-triplicar-no-brasil-em-2030-e-atingir-r-37-bilhoes.html>. Acesso em: 14 jul. 2021.

FUJINAWA, M. F.; PONTES, N. C.; BOREL, F. C.; HALFELD-VIEIRA, B. A.; GOES, A.; MORANDI, M. A. B. Biological control of gray mold and Myrothecium leaf spot in begonias. **Crop Protection**, v. 133, article 105138, 2020.

GALVÃO, J. A. H.; BETTIOL, W. Effects of UV-B radiation on *Lecanicillium* spp., biological control agents of the coffee leaf rust pathogen. **Tropical Plant Pathology**, v. 39, n. 5, p. 392-400, 2014.

GHINI, R.; BETTIOL, W. Coletor solar para desinfestação de substratos. **Summa Phytopathologica**, v. 17, n. 3/4, p. 281-286, 1991.

GHINI, R.; BETTIOL, W.; HAMADA, E. Diseases in tropical and plantation crops as affected by climate changes: current knowledge and perspectives. **Plant Pathology**, v. 60, n. 1, p. 122-132, 2011. Special issue.

GHINI, R.; FORTES, N. L. P.; NAVAS-CORTES, J. A.; SILVA, C. A.; BETTIOL, W. Combined effects of soil biotic and abiotic factors, influenced by sewage sludge incorporation, on the incidence of corn stalk rot. **PLoS ONE**, v. 11, n. 5, e0155536, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155536>.

GHINI, R.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; COSTA, L. B.; BETTIOL, W. Research approaches, adaptation strategies, and knowledge gaps concerning the impacts of climate change on plant diseases. **Tropical Plant Pathology**, v. 37, n. 1, p. 5-24, 2012.

GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. Climate change and plant diseases. **Scientia Agricola**, v. 65, n. esp., p. 98-107, 2008.

GHINI, R.; KIMATI, H. Método de iscas para obtenção de isolados de *Trichoderma* antagonísticos a *Botrytis cinerea*. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPDA, 1989. 13 p. (EMBRAPA-CNPDA. Boletim de Pesquisa, 3).

GHINI, R.; PATRICIO, F. R. A.; BETTIOL, W.; ALMEIDA, I. M. G. de; MAIA, A. de H. N. Effect of sewage sludge on suppressiveness to soil-borne plant pathogens. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 39, n. 11, p. 2797-2805, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.06.002>.

GHINI, R.; SCHOENMAKER, I. A. S.; BETTIOL, W. Solarização do solo e incorporação de fontes de matéria orgânica no controle de *Pythium* spp. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 9, p. 1253-1261, 2002.

GLIESSMAN, S. R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável**. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 653 p.

HALFELD-VIEIRA, B. A.; SILVA, W. L. M.; SCHURT, D. A.; ISHIDA, A. K. N.; SOUZA, G. R.; NECHET, K. L. Understanding the mechanism of biological control of passionfruit bacterial blight promoted by autochthonous phylloplane bacteria. **Biological Control**, v. 80, p. 40-49, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2014.09.011>.

HALIFU, S.; DENG, X.; SONG, X. H.; SONG, R. Effects of two *Trichoderma* strains on plant growth, rhizosphere soil nutrients, and fungal community of *Pinus sylvestris* var. mongolica annual seedlings. **Forests**, v. 10, n. 9, article 758, 2019.

HARMAN, G. E.; HOWELL, C. R.; VITERBO, A.; CHET, I.; LORITO, M. *Trichoderma* species - Opportunistic, avirulent plant symbionts. **Nature Reviews Microbiology**, v. 2, n. 1, p. 43-56, 2004.

HARMAN, G. E.; SHORESH, M. The mechanisms and applications of symbiotic opportunistic plant symbionts. In: VURRO, M.; GRESSEL, J. (ed.). **Novel biotechnologies for biocontrol agent enhancement and management**. Dordrecht: Springer, 2007. p. 131-155.

HECK, D. W.; GHINI, R.; BETTIOL, W. Deciphering the suppressiveness of banana Fusarium wilt with organic residues. **Applied Soil Ecology**, v. 138, p. 47-60, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.021>.

HOITINK, H. A. J.; BOEHM, M. J. Biocontrol within the contest of soil microbial communities: a substrate-dependent phenomenon. **Annual Review Phytopathology**, v. 37, p. 427-446, 1999.

HOWELL, C. R. Mechanisms employed by *Trichoderma* species in the biological control of plant diseases: the history and evolution of current concepts. **Plant Disease**, v. 87, n. 1, p. 4-10, 2003.

HUE, A. G.; VOLDENG, H. D.; SAVARD, M. E.; FEDAK, G.; TIAN, X.; HSIANG, T. Biological control of Fusarium head blight of wheat with *Clonostachys rosea* strain ACM94I. **Canadian Journal of Plant Pathology**, v. 31, n. 2, p. 169-179. 2009.

IBAMA. Portaria Normativa nº 131, de 03 de novembro de 1997. Estabelece os critérios a serem adotados. **Diário Oficial da União**, 4 nov. 1997. Seção 1, p. 24988-24991.

IWANICKI, N. S.; MASCARIN, G. M.; MORENO, S. G.; EILENBERG, J.; DELALIBERA JUNIOR, I. Growth kinetic and nitrogen source optimization for liquid culture fermentation of *Metarhizium robertsii* blastospores and bioefficacy against the corn leafhopper *Dalbulus maidis*. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 36, article 71, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02844-z>.

JACKSON, M. A.; KOBORI, N. N.; MASCARIN, G. M. *Trichoderma* compositions and methods of use. PCT/US 20 15/050484, 24 Mar. 2016.

JACKSON, M. A.; MASCARIN, G. M. **Stable fungal blastospores and methods for their production, stabilization and use**. Int.: EP15842609.8A, 2016. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2016044091>. Acesso em: 15 dez. 2021.

JACOBS, J. L.; SUNDIN, G. W. Effect of solar UV-B radiation on a phyllosphere bacterial community. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 67, n. 12, p. 5488-5496, 2001.

JANISIEWICZ, W. J.; KORSTEN, L. Biological control of postharvest disease of fruits. **Annual Review of Phytopathology**, v. 40, p. 411-441, 2002.

JENSEN, B.; KNUDSEN, I. M. B.; MADSEN, M.; JENSEN, D. F. Biopriming of infected carrot seed with an antagonist, *Clonostachys rosea*, selected for control of seedborne *Alternaria* spp. **Phytopathology**, v. 94, n. 6, p. 551-560. 2004.

KARLSSON, M.; DURLING, M. B.; CHOI, J.; KOSAWANG, C.; LACKNER, G.; TZELEPIS, G. D.; NYGREN, K.; DUBEY, M. K.; KAMOU, N.; LEVASSEUR, A.; ZAPPARATA, A.; WANG, J. H.; AMBY, D. B.; JENSEN, B.; SARROCCO, S.; PANTERIS, E.; LAGOPODI, A. L.; POGGELER, S.; VANNACCI, G.; COLLINGE, D. B.; HOFFMEISTER, D.; HENRISSAT, B.; LEE, Y. H.; JENSEN, D. F. Insights on the evolution of mycoparasitism from the genome of *Clonostachys rosea*. **Genome Biology and Evolution**, v. 7, n. 2, p. 465-80, 2015.

KOBORI, N. N.; MASCARIN, G. M.; JACKSON, M. A.; SCHISLER, D. A. Liquid culture production of microsclerotia and submerged conidia by *Trichoderma harzianum* active against damping-off disease caused by *Rhizoctonia solani*. **Fungal Biology**, v. 119, n. 4, p. 179-190, Apr. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2014.12.005>.

KUTER, G. A.; HOITINK, H. A. J.; CHEN, W. Effects of municipal sludge compost curing time on suppression of *Pythium* and *Rhizoctonia* of ornamental plants. **Plant Disease**, v. 72, n. 9, p. 751-756, 1988.

KUPPER, K. C.; CORREA, E. B.; MORETTO, C.; BETTIOL, W.; GOES, A. de. Control of *Guignardia citricarpa* by *Bacillus subtilis* and *Trichoderma* spp. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, n. 4, p. 1111-1118, 2011.

- LAZZARETTI, E.; BETTIOL, W. Tratamento de sementes de arroz, trigo, feijão e soja com um produto formulado à base de células e de metabólitos de *Bacillus subtilis*. *Scientia Agricola*, v. 54, n. 1/2, p. 89-96, 1997.
- LAZZARETTI, E.; MENTEM, J. O. M.; BETTIOL, W. *Bacillus subtilis* antagonísticos aos principais patógenos associados a sementes de feijão e trigo. *Fitopatologia Venezuelana*, v. 7, n. 2, p. 42-46, 1994.
- LAZZARETTI, E.; MENTEM, J. O. M.; BETTIOL, W. Tratamento de sementes de trigo com *Bacillus subtilis* para o controle de *Pyricularia oryzae*, *Bipolaris sorokiniana* e *Alternaria tenuis*. *Summa Phytopathologica*, v. 21, n. 2, p. 163-167, 1995.
- LEONI, C.; GHINI, R. Sewage sludge effect on management of *Phytophthora nicotianae* in citrus. *Crop Protection*, v. 25, n. 1, p. 10-22, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2005.03.004>.
- LENTEREN, J. C. van. Benefits and risks of introducing exotic macro biological control agents into Europe. *EPPO Bulletin*, v. 27, n. 1, p. 15-27, 1997. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2338.1997.tb00611.x>.
- LENTEREN, J. C.; BOLKMANS, K.; KÖHL, J.; RAVENSBERG, W. J.; URBANEJA, A. Biological control using invertebrates and microorganisms: plenty of new opportunities. *BioControl*, v. 63, n. 1, p. 39-59, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10526-017-9801-4>.
- LEWIS, J. A.; LUMSDEN, R. D.; MILLNER, P. D.; KEINATH, A. P. Suppression of damping-off of peas and cotton in the field with composted sewage sludge. *Crop Protection*, v. 11, n. 3, p. 260-266, 1992.
- LI, J.; YANG, J.; HUANG, X.; ZHANG, K-Q. Purification and characterization of an extracellular serine protease from *Clonostachys rosea* and its potential as a pathogenic factor. *Process Biochemistry*, v. 41, n. 4, p. 925-929, 2006.
- LIRA, A. C. de; MASCARIN, G. M.; DELALIBERA JUNIOR, I. Microsclerotia production of *Metarhizium* spp. for dual role as plant biostimulant and control of *Spodoptera frugiperda* through corn seed coating. *Fungal Biology*, v. 124, n. 8, p. 689-699, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2020.03.011>.
- LOURENZANI, A. E. B. S.; LOURENZANI, W. L.; BATALHA, M. O. Barreiras e oportunidades na comercialização de plantas medicinais provenientes da agricultura familiar. *Informações Econômicas*, v. 34, n. 3, p. 15-25, 2004.
- LUCAS, P.; SARNIGUET, A. Biological control of soil-borne pathogens with resident versus introduced antagonists: should diverging approaches become strategic convergence? In: BARBOSA, P. (ed.). *Conservation biological control*. San Diego: Academic Press, 1998. p. 1-8.
- LUMSDEN, R. D.; LEWIS, J. A.; MILLNER, P. D. Effect of composted sewage sludge on several soilborne pathogens and diseases. *Phytopathology*, v. 73, n. 11, p. 1543-1548, 1983.
- LUMSDEN, R. D.; MILLNER, P. D.; LEWIS, J. A. Suppression of lettuce drop caused by *Sclerotinia minor* with composted sewage sludge. *Plant Disease*, v. 70, n. 3, p. 197-201, 1986.
- MACENA, A. M. F.; KOBORI, N. N.; MASCARIN, G. M.; VIDA, J. B.; HARTMAN, G. L. Antagonism of *Trichoderma*-based biofungicides against Brazilian and North American isolates of *Sclerotinia sclerotiorum* and growth promotion of soybean. *BioControl*, v. 65, n. 2, p. 235-246, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10526-019-09976-8>.

MAGANHOTO, N. H. Otimização dos parâmetros para fermentação líquida submersa de *Clonostachys rosea*. 2020. 78 f. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

MARCIANO, A. F.; MASCARIN, G. M.; FRANCO, R. F. F.; GOLO, P. S.; JARONSKI, S. T.; FERNANDES, E. K. K.; BITTENCOURT, V. R. E. P. Innovative granular formulation of *Metarhizium robertsii* microsclerotia and blastospores for cattle tick control. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, article 4972, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84142-8>.

MARTINEZ, D.; BERKA, R. M.; HENRISSAT, B.; SALOHEIMO, M.; ARVAS, M.; BAKER, S. E.; CHAPMAN, J.; CHERTKOV, O.; COUTINHO, P. M.; CULLEN, D.; DANCHIN, E. G. J.; GRIGORIEV, I. V.; HARRIS, P.; JACKSON, M.; KUBICEK, C. P.; HAN, C. S.; HO, I.; LARRONDO, L. F.; DE LEON, A. L.; MAGNUSON, J. K.; MERINO, S.; MISRA, M.; NELSON, B.; PUTNAM, N.; ROBBERTSE, B.; SALAMOV, A. A.; SCHMOLL, M.; TERRY, A.; THAYER, N.; WESTERHOLM-PARVINEN, A.; SCHOCH, C. L.; YAO, J.; BARBOTE, R.; NELSON, M. A.; DETTER, C.; BRUCE, D.; KUSKE, C. R.; XIE, G.; RICHARDSON, P.; ROKHSAR, D. S.; LUCAS, S. M.; RUBIN, E. M.; DUNN-COLEMAN, N.; WARD, M.; BRETTIN, T. S. Genome sequencing and analysis of the biomass-degrading fungus *Trichoderma reesei* (syn. *Hypocrea jecorina*). **Nature Biotechnology**, v. 26, n. 5, p. 553-560, 2008.

MARTINS-CORDER, M. P.; MELO, I. S. de. Antagonismo *in vitro* de *Trichoderma* spp. a *Verticillium dahliae* KLEB. **Scientia Agrícola**, v. 55, n. 1, p. 1-7, 1998.

MASCARIN, G. M.; JACKSON, M. A.; BEHLE, R. W.; KOBORI, N. N.; DELALIBERA JÚNIOR, I. Improved shelf life of dried *Beauveria bassiana* blastospores using convective drying and active packaging processes. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 100, n. 19, p. 8359-8370, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7597-2>.

MASCARIN, G. M.; JACKSON, M. A.; KOBORI, N. N.; BEHLE, R. W.; DELALIBERA JÚNIOR, I. Liquid culture fermentation for rapid production of desiccation tolerant blastospores of *Beauveria bassiana* and *Isaria fumosorosea* strains. **Journal of Invertebrate Pathology**, v. 127, p. 11-20, 2015a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jip.2014.12.001>.

MASCARIN, G. M.; JACKSON, M. A.; KOBORI, N. N.; BEHLE, R. W.; DUNLAP, C. A.; DELALIBERA JÚNIOR, I. Glucose concentration alters dissolved oxygen levels in liquid cultures of *Beauveria bassiana* and affects formation and bioefficacy of blastospores. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 99, n. 16, p. 6653-6665, 2015b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6620-3>.

MASCARIN, G. M.; KOBORI, N. N.; JACKSON, M. A.; DUNLAP, C. A.; DELALIBERA JUNIOR, I. Nitrogen sources affect productivity, desiccation tolerance and storage stability of *Beauveria bassiana* blastospores. **Journal of Applied Microbiology**, v. 124, n. 3, p. 810-820, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.13694>.

MASCARIN, G. M.; LOPES, R. B.; DELALIBERA JUNIOR, Í.; FERNANDES, E. K. K.; LUZ, C.; FARIA, M. R. de. Current status and perspectives of fungal entomopathogens used for microbial control of arthropod pests in Brazil. **Journal of Invertebrate Pathology**, v. 165, p. 46-53, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jip.2018.01.001>.

MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇİ, O.; YU, R.; ZHOU, B. (ed.). **Climate change 2021: the physical science basis: contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge University Press: IPCC, 2021. 31 p. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf). Acesso em: 22 abr. 2021.

- MATES, A. P. K.; PONTES, N. C.; HALFELD-VIEIRA, B. A. *Bacillus velezensis* GF267 as a multi-site antagonist for the control of tomato bacterial spot. **Biological Control**, v. 137, article 104013, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104013>.
- MEDEIROS, C. A. A.; BETTIOL, W. Multifaceted intervention of *Bacillus* spp. against salinity stress and Fusarium wilt in tomato. **Journal of Applied Microbiology**, v. 131, n. 5, p. 2387-2401, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/jam.15095>.
- MELO, I. S. de; FAULL, J. L. Parasitism of *Rhizoctonia solani* by strains of *Trichoderma* spp. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 1, p. 55-59, 2000.
- MELO, I. S. de; FAULL, J. L.; GRAEME-COOK, K.A. Relationship between *in vitro* cellulase production of uv-induced mutants of *Trichoderma harzianum* and their bean rhizosphere competence. **Mycological Research**, v. 101, n. 11, p. 1389-1392, 1997.
- MELO, I. S. de; SILVA, A. C. F. Resistance of U.V. induced mutants of *Trichoderma harzianum* to benzimidazole and dicarboximide fungicides. **Giornale Di Patologia Delle Piante**, v. 1, n. 2, p. 151-152, 1991.
- MENDES, L.; GHINI, R.; BETTIOL, W. Effects of elevated atmospheric carbon dioxide on the biological control of coffee leaf rust under controlled conditions. **IOBC/WPRS Bulletin**, v. 78, p. 189-192, 2012.
- MENDES, R.; GARBEVA, P.; RAAIJMAKERS, J. M. The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 37, n. 5, p. 634-663, 2013.
- MENDES, R.; KRUIJT, M.; DE BRUIJN, I.; DEKKERS, E.; VOORT, M. van der; SCHNEIDER, J. H. M.; PICENO, Y. M.; DESANTIS, T. Z.; ANDERSEN, G. L.; BAKKER, P. A. H. M.; RAAIJMAKERS, J. M. Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria. **Science**, v. 332, n. 6033, p. 1097-1100, 2011.
- MEZIANE, H.; SLUIS, I. van der; LOON, L. C. van; HÖFTE, M.; BAKKER, P. A. H. M. Determinants of *Pseudomonas putida* WCS358 involved in inducing systemic resistance in plants. **Molecular Plant Pathology**, v. 6, n. 2, p. 177-185, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2005.00276.x>.
- MILLNER, P. D.; LUMSDEN, R. D.; LEWIS, J. A. Controlling plant disease with sludge compost. **Biocycle**, v. 23, p. 50-52, 1982.
- MIZUBUTI, E. S. G.; MAFFIA, L. A. Aplicações de princípios de controle no manejo ecológico de doenças de plantas. **Informe Agropecuário**, v. 22, n. 212, p. 9-18, 2001.
- MONTE, E.; BETTIOL, W.; HERMOSA, R. *Trichoderma* e seus mecanismos de ação para o controle de doenças de plantas. In: MEYER, M. C.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. da (ed.). **Trichoderma: uso na agricultura**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. p. 181-199.
- MORANDI, M. A. B. Integração de métodos físicos e biológicos de doenças em viveiros de plantas medicinais: estudo de caso com *Cordia verbenacea*. **Summa Phytopathologica**, v. 34, p. 179, 2008. Suplemento.
- MORANDI, M. A. B. Integração de métodos físicos e biológicos no controle de doenças em viveiros de plantas medicinais: estudo de caso com *Cordia verbenacea*. In: BETTIOL, W.; MORANDI, M. A. B. (ed.). **Biocontrole de doenças de plantas: uso e perspectivas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2009. p. 337-341.

- MORANDI, M. A. B.; BETTIOL, W. Integração de métodos biocompatíveis no manejo de doenças e pragas: experiências em plantas ornamentais e medicinais. **Tropical Plant Pathology**, v. 33, p. 31-34, 2008. Suplemento.
- MORANDI, M. A. B.; BETTIOL, W.; GHINI, R. Situação do controle biológico de doenças de plantas no Brasil. In: VENZON, M.; PAULA JÚNIOR, T. J.; PALLINI, A. **Controle alternativo de pragas e doenças**. Viçosa: Epamig; UFV, 2005. p. 247-268.
- MORANDI, M. A. B.; COSTA, L. B. Biological control of *Sclerotinia sclerotiorum* on beans in field by *Trichoderma asperellum* and *Clonostachys rosea*. **IOBC/WPRS Bulletin**, v. 43, p. 243-246, 2009.
- MORANDI, M. A. B.; MAFFIA, L. A.; MIZUBUTI, E. S. G.; ALFENAS, A. C.; BARBOSA, J. G. Suppression of *Botrytis cinerea* sporulation by *Clonostachys rosea* on rose debris: a valuable component in Botrytis blight management in commercial greenhouses. **Biological Control**, v. 26, n. 3, p. 311-317, 2003.
- MORANDI, M. A. B.; MAFFIA, L. A.; MIZUBUTI, E. S. G.; ALFENAS, A. C.; BARBOSA, J. G.; CRUZ, C. D. Relationships of microclimatic variables to colonization of rose debris by *Botrytis cinerea* and the biocontrol agent *Clonostachys rosea*. **Biocontrol Science and Technology**, v. 16, n. 6, p. 619-630, 2006.
- MORANDI, M. A. B.; MAFFIA, L. A.; SUTTON, J. C. Development of *Clonostachys rosea* and interactions with *Botrytis cinerea* in rose leaves and residues. **Phytoparasitica**, v. 29, n. 2, p. 103-113, 2001.
- MORANDI, M. A. B.; MATTOS, L. P. V.; SANTOS, E. R. dos; BONUGLI, R. C. Influence of application time on the establishment, survival, and ability of *Clonostachys rosea* to suppress *Botrytis cinerea* sporulation on rose debris. **Crop Protection**, v. 27, n. 1, p. 77-83, 2008.
- MORANDI, M. A. B.; SANTOS, E. R.; MATTOS, L. P. V.; BONUGLI, R. C. Associação de lodo de esgoto e *Clonostachys rosea* para a supressão de *Botrytis cinerea* em restos culturais de roseira. **Summa Phytopathologica**, v. 31, n. 4, p. 357-365, 2005.
- MORANDI, M. A. B.; SUTTON, J. C.; MAFFIA, L. A. Effects of host and microbial factors on development of *Clonostachys rosea* and control of *Botrytis cinerea* in rose. **European Journal of Plant Pathology**, v. 106, n. 5, p. 439-448, 2000a.
- MORANDI, M. A. B.; SUTTON, J. C.; MAFFIA, L. A. Relationships of aphid and mite infestations to control of *Botrytis cinerea* by *Clonostachys rosea* in rose (*Rosa hybrida*) leaves. **Phytoparasitica**, v. 28, n. 1, p. 55-64, 2000b.
- MOUEKOUBA, L. D. O.; ZHANG, L. L.; GUAN, X.; CHEN, X. L.; CHEN, H. Y.; ZHANG, J.; ZHANG, J. F.; LI, J. F.; YANG, Y. J.; WANG, A. X. Analysis of *Clonostachys rosea*-induced resistance to tomato gray mold disease in tomato leaves. **Plos One**, v. 9, n. 7, Jul 2014.
- MUELLER, J. D.; SINCLAIR, J. B. Occurrence and role of *Gliocladium roseum* in field-grown soybeans in Illinois. **Transaction of British Mycological Society**, v. 86, n. 4, p. 677-680, 1986.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Alternative agriculture**. Washington, D.C.: National Academy Press, 1989. 448 p.
- NELSON, E. B.; BOEHM, M. J. Compost-induced suppression of turf grass diseases. **BioCycle**, v. 43, n. 6, p. 51-55, 2002.

NELSON, E. B.; CRAFT, C. M. Suppression of dollar spot on creeping bentgrass and annual bluegrass turf with compost- amended topdressings. **Plant Disease**, v. 76, n. 9, p. 954-958, 1992.

NOBRE, S. A. M.; MAFFIA, L. A.; MIZUBUTI, E. S. G.; COTA, L. V.; DIAS, A. P. S. Selection of *Clonostachys rosea* isolates from Brazilian ecosystems effective in controlling *Botrytis cinerea*. **Biological Control**, v. 34, n. 2, p. 132-43, 2005.

NUNES, F. V. **Isolamento e identificação de bactérias endofíticas do café (*Coffea arabica* e *Coffea robusta*) e seu potencial biotecnológico**. 2004. São Paulo: USP/Interunidades, 2004. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Instituto de Ciências Biomédicas, São Paulo.

PAULA JÚNIOR, T. J.; TEIXEIRA, H.; FADINI, M. A. M.; VENZON, M.; JESUS JÚNIOR, W. C.; MORANDI, M. A. B.; PALLINI, A. Interações entre fitófagos e patógenos de plantas. **Revisão Anual de Patologia de Plantas**, v. 15, p. 353-402, 2007.

PINTO, Z. V.; LUCON, C. M. M.; BETTIOL, W. Controle de qualidade de produtos biológicos à base de *Trichoderma*. In: MEYER, M. C.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. da (ed.). **Trichoderma: uso na agricultura**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. pt. 3. cap. 9. p. 275-295.

PINTO, Z. V.; MORANDI, M. A. B.; BETTIOL, W. Induction of suppressiveness to Fusarium wilt of chrysanthemum with composted sewage sludge. **Tropical Plant Pathology**, v. 38, n. 5, p. 414-422, 2013.

QUALIBIO *Bacillus*. Quantificação e identificação de *Bacillus subtilis* e *Bacillus licheniformis*. Disponível em: [https://www.cnpmembrapa.br/down\\_site/forum/2012/bacillus/ApostilaCursoBacillus2012.pdf](https://www.cnpmembrapa.br/down_site/forum/2012/bacillus/ApostilaCursoBacillus2012.pdf). Acesso em: 12 ago. 2021.

RABEENDRAN, N.; MOOT, D.J.; JONES, E.E.; STEWART, A. Inconsistent growth. promotion of cabbage and lettuce from *Trichoderma* isolates. **New Zealand Plant Protection**, v. 53, p. 143-146, 2000.

RESEARCH AND MARKETS. **Biopesticides market: growth, trends, COVID-19 impact, and forecasts (2022 - 2027)**. Disponível em: [https://www.researchandmarkets.com/reports/5165415/biopesticides-market-growth-trends-covid-19?utm\\_source=MC&utm\\_medium=Email&utm\\_code=mzrsvl929&utm\\_ss=24&utm\\_campaign=1554826++Biopesticides+Market++Growth%2c+Trends%2c+COVID-19+Impact%2c+and+Forecasts+\(2021++2026\)&utm\\_exec=adke277mtd](https://www.researchandmarkets.com/reports/5165415/biopesticides-market-growth-trends-covid-19?utm_source=MC&utm_medium=Email&utm_code=mzrsvl929&utm_ss=24&utm_campaign=1554826++Biopesticides+Market++Growth%2c+Trends%2c+COVID-19+Impact%2c+and+Forecasts+(2021++2026)&utm_exec=adke277mtd). Acesso em: 14 jul. 2021.

REYES, L. F. **Diversidade de bactérias em manguezal e biodegradação de hidrocarbonetos poliaromáticos**. 2009. 123 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

RIBEIRO, C. M. C.; SOUZA, G. R.; SCHURT, D. A.; HALFELD-VIEIRA, B. A. Pyoverdine use for the control of passion fruit bacterial blight. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 10, p. 956-959, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2017001000017>.

RODRIGUEZ, M. A.; CABRERA, G.; GOZZO, F. C.; EBERLIN, M. N.; GODEAS, A. *Clonostachys rosea* BAFC3874 as a *Sclerotinia sclerotiorum* antagonist: mechanisms involved and potential as a biocontrol agent. **Journal of Applied Microbiology**, v. 110, n. 5, p. 1177-86, 2011.

RONQUE, E. R. V. Principais pragas da cultura do morangueiro. In: DUARTE FILHO, J.; CANÇADO, G. M. A.; REGINA, M. A.; ANTUNES, L. E. C.; FADINI, M. A. M. **Morango: tecnologia de produção e processamento**. Caldas: EPAMIG, 1999. p. 51-64.

- SAMUELS, G. J. *Trichoderma*: systematics, the sexual state, and ecology. **Phytopathology**, v. 96, n. 2, p. 195-206, 2006.
- SANTOS, C. C.; CASTRO, H. A.; BETTIOL, W.; ANGELI JUNIOR, A. Sensibilidade *in vitro* de uredíniosporos de *Puccinia psidii* a *Bacillus subtilis*. **Summa Phytopathologica**, v. 24, n. 2, p. 183-185, 1999.
- SANTOS, E. R.; PINTO, Z. V.; ALMEIDA, E. G.; MORANDI, M. A. B.; BETTIOL, W. Validação de ferramenta computacional para contagem de esporos e calibração de suspensão de inóculo CALIBRA. **Summa Phytopathologica**, v. 34, 2011. Resumo n. 88.
- SANTOS, I.; BETTIOL, W. Effect of sewage sludge on the rot and seedling damping-off of bean plants caused by *Sclerotium rolfsii*. **Crop Protection**, v. 22, p. 1093-1097, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(03\)00140-6](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(03)00140-6).
- SANTOS, I.; MAZZEO, A. N.; BETTIOL, W. Efeito do lodo de esgoto no tombamento de plântulas de pepino induzido por *Pythium aphanidermatum*. **Summa Phytopathologica**, v. 26, n. 1, p. 141, 2000.
- SANTOS, T. M. C. dos; MELO, I. S. de. Resistência de isolados de *Trichoderma* spp. e *Penicillium* spp. a fungicidas *in vitro*. Jaguaruina: EMBRAPA-CNPDA, 1989. 18 p. (EMBRAPA-CNPDA. Boletim de Pesquisa, 5).
- SANTOS, T. R.; PAIXÃO, F. R. S. da; CATÃO, A. M. L.; MUNIZ, E. R.; RIBEIRO-SILVA, C. S.; TAVEIRA, S. F.; LUZ, C.; MASCARIN, G. M.; FERNANDES, E. K. K.; MARRETO, R. N. Inorganic pellets containing microsclerotia of *Metarhizium anisopliae*: a new technological platform for the biological control of the cattle tick *Rhipicephalus microplus*. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 105, n. 12, p. 5001-5012, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11372-1>.
- SARAIVA, R. M.; BORGES, A. V.; MACEDO, P. E. F.; MAFFIA, L. A. Uso e perspectiva de *Clonostachys rosea* como agente de biocontrole. **Revista de Ciências Agrícolas**, v. 31, p. 78-91, 2014.
- SARAIVA, R. M.; CZYMMEK, K. J.; BORGES, Á. V.; CAIRES, N. P.; MAFFIA, L. A. Confocal microscopy study to understand *Clonostachys rosea* and *Botrytis cinerea* interactions in tomato plants. **Biocontrol Science and Technology** v. 25, n. 1, p. 56-71, 2015.
- SCHIRMBOCK, M.; LORITO, M.; WANG, Y. L.; HAYES, C. K.; ARISAN-ATAC, I.; SCALA, F.; HARMAN, G. E.; KUBICEK, C. P. Parallel formation and synergism of hydrolytic enzymes and peptaibolantibiotics, molecular mechanisms involved in the antagonistic action of *Trichoderma harzianum* against phytopathogenic fungi. **Applied Environmental Microbiology**, v. 60, n. 12, p. 4364-4370, 1994.
- SCHNEIDER, R. W. *Suppressive soils and plant disease*. St. Paul: APS Press, 1982. 85 p.
- SCHROERS, H. J.; SAMUELS, G. J.; SEIFERT, K. A.; GAMS, W. Classification of the mycoparasite *Clonostachys rosea* in *Clonostachys* as *C. rosea*, its relationship to *Bionectria ochroleuca*, and notes on other *Gliocladium*-like fungi. **Mycologia**, v. 91, n. 2, p. 365-385, 1999.
- SHIOMI, H. F.; SILVA, H. S. A.; MELO, I. S. de; NUNES, F. V.; BETTIOL, W. Bioprospecting endophytic bacteria for biological control of coffee leaf rust. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 1, p. 32-39, 2006.
- SILVA, A. V. R. da; SILVA, T. P. da; MORANDI, M. A. B.; BETTIOL, W.; MASCARIN, G. M. Fermentação líquida de *Clonostachys rosea* e bioeficácia contra *Sclerotinia sclerotiorum*. In: CONGRESSO

INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 15., 2021, Campinas. **Anais...** Campinas: Instituto de Zootecnia, 2021. Evento online. CIIC 2021. RE21403.

SILVA, H. S. A.; TERRASAN, C. R. F.; TOZZI, J. P. L.; MELO, I. S. de; BETTIOL, W. Bactérias endófitas do cafeeiro e a indução de enzimas relacionadas com o controle da ferrugem (*Hemileia vastatrix*). **Tropical Plant Pathology**, v. 33, n. 1, p. 49-54, 2008.

SILVA, H. S. A.; TOZZI, J. P. L.; TERRASAN, C. R. F.; BETTIOL, W. Endophytic microorganisms from coffee tissues as plant growth promoters and biocontrol agents of coffee leaf rust. **Biological Control**, v. 63, p. 62-67, 2012.

SILVA, L. G.; ANDRADE, C. A.; BETTIOL, W. Biochar amendment increases soil microbial biomass and plant growth and suppress *Fusarium* wilt in tomato. **Tropical Plant Pathology**, v. 45, n. 1, p. 73-83, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40858-020-00332-1>.

SIMÕES, C. T. **Prospecção de elicitores derivados de patógenos visando o controle da mancha bacteriana do tomateiro**. 2020. 77 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Proteção de Plantas) - Unesp, Botucatu.

SIMÕES, C. T.; CARVALHO, V. N.; HALFELD-VIEIRA, B. de A. Prospecting of pathogen-derived elicitors for the control of tomato bacterial spot. **Journal of Plant Protection Research**, v. 61, n. 2, p. 183-188, 2021.

SIVASITHAMPARAM, K.; GHISALBERTI, E. Secondary metabolism in *Trichoderma* and *Gliocladium*. In: KUBICEK, C. P.; HARMAN, G. E. (ed.). *Trichoderma and Gliocladium*. London: Taylor & Francis, 2002. p. 139-191.

SUTTON, J. C.; LI, W.; PENG, G.; YU, H.; ZHANG, P.; VALDEBENITO-SANHUEZA, R.M. *Gliocladium roseum*: a versatile adversary of *Botrytis cinerea* in crops. **Plant Disease**, v. 81, n. 4, p. 316-328, 1997.

SUTTON, J. C.; LIU, W.; HUANG, R.; OWEN-GOING, N. Ability of *Clonostachys rosea* to establish and suppress sporulation potential of *Botrytis cinerea* in deleafed stems of hydroponic greenhouse tomatoes. **Biocontrol Science and Technology**, v. 12, n. 4, p. 413-25, 2002.

SUTTON, J. C.; PENG, G. Biocontrol of *Botrytis cinerea* in strawberry leaves. **Phytopathology**, v. 83, n. 6, p. 615-621, 1993.

STADNIK, M. J.; BETTIOL, W. Association between lipoxygenase and peroxidase activity and systemic protection of cucumber plants against *Podosphaera xanthii* induced by *Oudemansiella canarii* extracts. **Journal of Plant Disease and Protection**, v. 114, n. 1, p. 9-13, 2007.

STADNIK, M. J.; BETTIOL, W.; SAITO, M. L. Bioprospecting for plant and fungus extracts with systemic effect to control the cucumber powdery mildew. **Journal of Plant Disease and Protection**, v. 110, n. 4, p. 383-393, 2003.

TENUTA, M.; LAZAROVITS G. Ammonia and nitrous acid from nitrogenous amendments kill the microsclerotia of *Verticillium dahliae*. **Phytopathology**, v. 92, n. 3, p. 255-264, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHTO.2002.92.3.255>.

TERAO, D.; FORNER, C.; MAIA, A. H. N.; BETTIOL, W. Potential use of bioagents in the control of postharvest rot in melon. **Acta Horticulturae**, v. 1053, p. 65-74, 2014.

TERAO, D.; NECHET, K. de L.; HALFELD-VIEIRA, B. de A. Competitive and colony layer formation ability as key mechanisms by yeasts for the control *Botryosphaeria dothidea* fruit rot of mango. **Tropical Plant Pathology**, v. 42, n. 6, p. 451-457, 2017a. (DOI 10.1007/s40858-017-0183-z).

TERAO, D.; NECHET, K. de L.; PONTE, M. S.; MAIA, A. de H. N.; ANJOS, V. D. de A.; HALFELD-VIEIRA, B. de A. Physical postharvest treatments combined with antagonistic yeast on the control of orange green mold. **Scientia Horticulturae**, v. 224, p. 317-323, 2017b.

THINES, E.; EILBERTA, F.; STERNERB, O.; ANKEA, H. Glisoprenin A, an inhibitor of the signal transduction pathway leading to appressorium formation in germinating conidia of *Magnaporthe grisea* on hydrophobic surfaces. **FEMS Microbiology Letters** v. 151, n. 2, p. 219-224, 1997.

UENO, B. Manejo integrado de doenças do morango. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO MORANGO, 2. ENCONTRO DE PEQUENAS FRUTAS E FRUTAS NATIVAS, 1., 2004, Pelotas. Palestras... Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004. p. 69-78. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 124).

VAZ, A. P. A.; SCARANARI, C.; BATISTA, L. A. R.; FIGUEIRA, G. M.; SARTORATTO, A.; MAGALHÃES, P. M. Biomassa e composição química de genótipos melhorados de espécies medicinais cultivadas em quatro municípios paulistas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 5, p. 869-872, 2006.

VICENTE, M. Invento pode estimular expansão da indústria de defensivos biológicos no Brasil. **Embrapa News**, 28 out. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/56774840/invento-pode-estimular-expansao-da-industria-de-defensivos-biologicos-no-brasil>. Acesso em: 29 nov. 2021.

VISCONTI, A.; BETTIOL, W.; MORANDI, M. A. B. Efeito de hidrolisado de peixe sobre o crescimento micelial e controle de *Cylindrocladium spathiphylli* em espatifilo. **Summa Phytopathologica**, v. 36, p. 298-308, n. 4, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-54052010000400004>.

VITERBO, A.; LANDAU, U.; KIM, S.; CHERNIN, L.; CHET, I. Characterization of ACC deaminase from the biocontrol and plant growth-promoting agent *Trichoderma asperellum* T203. **FEMS Microbiology Letters**, v. 305, p. 42-48, 2010.

VITTI, A. J.; GHINI, R. Sobrevivência de linhagens de '*Trichoderma*' resistentes a hidrodone em morangueiro. In: III REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE CONTROLE BIOLÓGICO DE DOENÇAS DE PLANTAS, 1989, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: [s.n.], 1989. p. 103.

WALKER, J. A.; MAUDE, R. B. Natural occurrence and growth of *Gliocladium roseum* on the mycelium and sclerotia of *Botrytis allii*. **Transaction of British Mycological Society**, v. 65, n. 2, p. 335-338, 1975.

WHIPPS, J. M. Behavior of fungi antagonistic to *Sclerotinia sclerotiorum* on plant tissue segments. **Journal of General Microbiology**, v. 133, n. 6, p. 1495-1501, 1987.

WISNIEWSKI, M.; WILSON, C.; DROBY, S.; CHALUT, E.; EL GHAOUTH, A.; STEVENS, C. Postharvest biocontrol: new concepts and applications. In: VICENT, C.; GOETTEL, M.S.; LAZAROVITS, G. (ed.). **Biocontrol: a global perspective**. Cabi, Wallingford, Oxfordshire, 2007. p. 262-273.

YU, H. Relationships of epidemiologic factors, *Gliocladium roseum*, and bee vectors to gray mold of raspberry caused by *Botrytis cinerea*. 1996. Ph.D. Thesis, University of Guelph, Canada.



# SERVIÇOS QUARENTENÁRIOS, VISANDO CONTROLE BIOLÓGICO CLÁSSICO, E ESTRATÉGIAS PARA PREVENÇÃO, MONITORAMENTO E CONTROLE DE PRAGAS

*Maria Conceição Peres Young Pessoa, Simone de Souza Prado, Jeanne Scardini  
Marinho-Prado, Bernardo de Almeida Halfeld-Vieira, Rafael Mingoti, Beatriz de Aguiar  
Giordano Paranhos, Gilberto José de Moraes e Rita de Cássia Lourenço*

## INTRODUÇÃO

No âmbito das atividades de defesa fitossanitária, o Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa), enquanto membro de organizações internacionais, tais como a Convenção Internacional de Proteção de Plantas (CIPV) da Organização das Nações Unidas (ONU) e as de Medidas Sanitárias e Fitossanitárias (*Sanitary and Phytosanitary Measures* (SPS), da Organização Mundial do Comércio (OMC)), e com base em avaliação de risco de introdução de pragas, elabora e publica, em Diário Oficial da União (DOU), Instrução Normativa (IN) disponibilizando a lista de pragas (insetos, ácaros e microrganismos patogênicos) exóticas de maior risco de introdução no país, com impactos significativos aos cultivos de importância nacional: as Pragas Quarentenárias Ausentes (PQA, antes citadas A1). Na detecção de uma nova praga exótica no território nacional, após identificação confirmada em laboratório por ele credenciado, esta é reportada pelo Mapa, em IN destacando as Pragas Quarentenárias Presentes (PQP, antes citadas A2). Do mesmo modo, planos de prevenção e controle são elaborados e conduzidos pelo Mapa, para evitar a entrada e disseminação dessas pragas exóticas (Flores et al., 1992; Sá et al., 2015, 2016).

O ingresso de uma praga exótica no país, principalmente quando apresentam condições bioecológicas mais propícias ao seu desenvolvimento e estabelecimento em cultivos hospedeiros aqui existentes, pode causar danos incalculáveis aos produtores, com reflexos socioeconômicos e ecológicos. Os custos de implementação de esforços de atividades de pesquisas preventivas são reportados em literatura como

significativamente menores que os necessários às medidas pós-ingresso de novas pragas no país (contenção, erradicação, monitoramento e controle e manejo) (Pessoa et al., 2017). Nesse contexto, diante dos desafios impostos pelos limites territoriais do Brasil, torna-se imprescindível prospectar locais e/ou regiões que apresentem maior aptidão ao estabelecimento e desenvolvimento ótimo de pragas exóticas, sejam PQA, PQP ou as já ingressas de importância econômica, para que neles sejam concentrados os esforços de prevenções e de controle (Pessoa et al., 2014a, 2014b, 2016a, 2016b, 2016c, 2016e; Mingoti et al., 2021a, 2021b). Porém, a grande quantidade de espécies listadas como PQA exigiu que atividades técnicas fossem direcionadas para priorizar aquelas a serem abordadas pela pesquisa agropecuária (Fidelis et al., 2018b), com espaço na carteira de portfólios de pesquisa da Embrapa.

Frente a esses desafios apresentados à agricultura brasileira e, conseqüentemente para a pesquisa agropecuária nacional, os Laboratórios de Quarentena “Costa Lima” (LQCL) e de Entomologia e Fitopatologia (LEF) da Embrapa Meio Ambiente vêm contribuindo ao longo dos últimos 40 anos com as atividades supracitadas, participando e disponibilizando informações, métodos, publicações, sistemas informatizados e materiais técnico-científicos e/ou alertas/informativos, bem como realizando capacitações de recursos humanos (em diferentes níveis, funções, instituições e países), para apoiar as principais estratégias oficiais do governo brasileiro de interesse à prevenção, erradicação, monitoramento e controle de pragas exóticas. De igual modo, também vêm realizando diversas atividades para viabilizar o controle biológico clássico de insetos-praga exóticas no país.

Este capítulo abordará exemplos dos serviços técnicos quarentenários prestados pela estação quarentenária do LQCL, visando ao intercâmbio internacional de organismos benéficos para o controle biológico clássico, bem como algumas atividades de pesquisa desenvolvidas pelo LQCL e LEF. Desse modo, exibirá resultados de estudos de estratégias de manejo de pragas de diferentes cultivos agrícolas e florestais no Brasil, com foco no controle biológico clássico. Também apresentará estudos metodológicos e ações desenvolvidas com foco na prospecção, prevenção, monitoramento, criação e controle de pragas, realizados em projetos de PD&I do Sistema Embrapa de Gestão (SEG) e em ações gerenciais estratégicas de agendas INTEGRO-Embrapa em apoio às ações do Departamento de Sanidade Vegetal e Insumos Agrícolas (DSV) da Secretaria de Defesa Agropecuária (SDA) do Mapa, para atender às políticas públicas de defesa vegetal nacional; muitos em conjunto com parceiros nacionais e internacionais. Resultados de pesquisas do LQCL e LEF compreendendo organismos exóticos e que promoveram o avanço no conhecimento e proposição de alternativas de controle para diferentes cadeias produtivas nacionais, com foco principalmente no controle biológico, também serão mostrados. De igual modo, serão relatadas participações em importantes fóruns nacionais e internacionais e em atividades de formação e capaci-

tação de recursos humanos, como também outras realizadas em apoio à formulação de protocolos de certificações inovadores na incorporação de identificação de pragas agrícolas e de aspectos de sustentabilidade ambiental, até então inexistentes no início dos anos 2000, tais como para a Produção Integrada de Frutas (PIF) do Brasil e os que viabilizaram elementos para a implantação de Boas Práticas Agropecuárias (BPA), com foco na Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC). Entre elas, as realizadas no âmbito de atividades do Convênio entre a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) e Embrapa, entre outros direcionamentos estratégicos alinhados aos principais objetivos de Planos Diretores da Embrapa (PDEs) com foco no atendimento às demandas de produtores nacional.

## SERVIÇOS QUARENTENÁRIOS EM APOIO ÀS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE BIOLÓGICO CLÁSSICO

A introdução de um organismo exótico no país, mesmo que benéfico, pode oferecer risco à sua fauna nativa e, por essa razão, existem protocolos oficiais e legais a serem seguidos para a realização do processo de importação ou exportação de um potencial organismo para fins de Controle Biológico Clássico (CBC) (Oliveira; Sá, 2006; Lenteren et al., 2011). Portanto, toda introdução ou envio de remessas desses organismos deve ser previamente demandada e autorizada pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) e Ministério do Meio Ambiente (MMA), e seguir rigorosamente os requisitos fitossanitários e de preservação de patrimônio genético nativo exigidos legalmente (Vasconcelos, 2012a, 2012b; Sá et al., 2016a).

O LQCL (antes citado por “LQC”) da Embrapa Meio Ambiente é credenciado, desde 1991, pelo Mapa como Estação Quarentenária (EQ) para realizar a quarentena de organismos úteis para o controle biológico de pragas e outros fins, seja para materiais da própria Embrapa ou de terceiros. O caráter inovador desse credenciamento à época foi singular, dado que, apesar de DeBach e Rosen (1991) já estarem reportando os benefícios financeiros advindos da redução de populações de insetos e ácaros pelo CBC, essa alternativa não era uma técnica usual no Brasil até o início deste século (Campanhola et al., 1995; Parra; Sá, 1992; Parra et al., 2002a, 2002b; Sá et al., 2002; Sá; Oliveira, 2006; Parra; Pinto, 2016). Mesmo assim, os pioneiros na pesquisa e uso de estratégias de controle biológico (Lopes, 1920; Bitancourt et al., 1933; Souza, 1943; Gallo, 1951, 1952; Gomes, 1962; Guagliumi, 1968; Gassen; Tambasco, 1983; Komatsu; Nakano, 1988; Gravena, 1990; Crocomo, 1990; Robbs, 1992; Botelho, 1992; Haji et al., 1992; Gazzoni, 1994; Cruz, 1995; Figueiredo et al., 1999), principalmente clássico e aumentativo, envidaram persistentes esforços para torna-la uma opção real, possibilitando conferir sucesso ao uso desse método de controle no contexto do Manejo Integrado de Pragas (MIP) nacional, incluindo florestais (Botelho, 1992; Alves, 1998; Sá et al., 2001b;

Sá, 2003; Parra et al., 2002a, 2002b; Lenteren, 2009; Bueno et al., 2011; Bueno et al., 2012; Sá; Pessoa, 2015; Bueno; Lenteren, 2016; Parra; Pinto, 2016; Wilcken et al., 2019). Vários desses estudos foram a base de outros que promoveram aplicações de técnicas diferenciadas para colaborar com as estratégias de controle biológico (Zucchi et al., 1989; Pessoa et al., 1993, 1995, 1996; Pessoa, 1994; Gazzoni, 1994; Cruz, 1995; Ambrosano et al., 1996; Habib et al., 1998; Botelho et al., 1999; Ternes et al., 2000; Suji et al., 2002).

Sendo o LQCL a única EQ credenciada pelo Mapa para esse fim até 2016, seus serviços técnicos quarentenários foram utilizados em todos os processos oficiais demandados ao Mapa desde 1991, seja de importações ou de exportações de organismos benéficos úteis ao controle biológico nacional ou internacional. Desse modo, as atividades exercidas pelo quarentenário da Embrapa Meio Ambiente sempre atenderam tecnicamente, de formas direta ou indireta, às demandas de pesquisa, desenvolvimento e de inovação das principais políticas públicas de defesa fitossanitária nacional, com foco em viabilizar conhecimento e alternativas para promoção de estratégias de controle biológico seguro ao país, favorecendo consequentemente a redução de impactos ambientais negativos ao meio ambiente (Tambasco et al., 2001b; Sá et al., 2016a; Sá, 2017). Vê-se, portanto, que o serviço quarentenário prestado pela EQ do LQCL é uma parte técnica importante e fundamental do processo de introdução ou exportação de organismos benéficos úteis para o controle biológico e para a realização de pesquisas nesse tema no país; apesar de muitas vezes não ser percebido pelo público em geral.

Na EQ são realizados os procedimentos técnicos necessários para a confirmação taxonômica da espécie recebida (artigo regulamentado) e para a segurança na manutenção e desenvolvimento desse organismo até sua liberação pelo Mapa, motivo pelo qual o LQCL possui estrutura própria e credenciada por este Ministério para esse fim (Sá et al., 2016a; IN Mapa n. 29 de 24/08/2016). No caso das importações, as atividades exercidas na EQ atestam que o material recebido tenha sido o inicialmente previsto e enviado corretamente, livre de outros organismos exóticos nocivos e/ou oportunistas tais como pragas de importância quarentenária, hiperparasitas e/ou microrganismos, entre outros que venham a comprometer a saúde, a agricultura e a diversidade das espécies nativas nacionais (Sá et al., 2016a). Em condição controlada e de segurança do laboratório de quarentena, as criações das espécies recebidas são mantidas, de acordo com protocolos e métodos estabelecidos, muitos resultantes de pesquisas metodológicas realizadas por pesquisadores do LQCL. Estes também estabelecem todos os cuidados para assegurar as manutenções das condições laboratoriais e de casas de vegetação, bem como a disponibilidade de plantas e/ou pragas (ou presas) hospedeiras para uso, quando necessários. Assim, estudos de todos os organismos envolvidos no processo de introdução são previamente realizados, com base em literatura e contatos com pesquisadores nacionais e internacionais, para serem antecipadamente co-

nhcidos e/ou adaptados para a determinação dos métodos, para que os trabalhos executados na EQ se desenvolvam mais rapidamente e de forma segura. Desse modo, obtém-se a maior garantia de que o conteúdo recebido/enviado pelas importações/exportações permaneça seguro e íntegro, enquanto mantido no LQCL. Caso sejam identificados contaminantes, organismo diferenciado do autorizado no processo e/ou tenha liberação/exportação não autorizada pelo Mapa, todo o material associado deve ser destruído dentro da própria quarentena. Caso autorizada liberação pelo Mapa, este será entregue ao demandante (solicitante) do processo. Mesmo neste caso, parte do material pode ainda ser mantido na estação por mais um período, permitindo ao demandante a implementação adequada de técnicas de manutenção dos organismos introduzidos em seus novos locais de cuidado, reduzindo casos de perda completa do material. Pelo exposto, para manter essa estrutura física e o serviço quarentenário operacional oferecidos pelo LQCL, a Embrapa Meio Ambiente mantém empregados e colaboradores terceirizados capacitados para operar adequadamente na execução de suas funções, seja técnica, de manutenção de infraestrutura, criações e limpeza e/ou de gerenciamento dos serviços prestados pela estação. O LQCL conta também com o apoio técnico de renomados pesquisadores externos à Embrapa Meio Ambiente, nacionais e internacionais, para a realização de confirmações taxonômicas de espécies ou apoio ad hoc, sempre que necessário. No caso das introduções de insetos exóticos, exemplares recebidos pela EQ do LQCL são mantidos em coleção de espécies *Voucher* (Tavares; De Nardo, 1998; Costa; De Nardo, 1998; Sá et al., 2016a). Quando considerados os serviços prestados pela EQ do LQCL em seus primeiros anos de existência (de 1991 até 2000), observa-se sua participação nos diversos processos de introduções de espécies de organismos benéficos, tendo predominado parasitoides, bactérias, ácaros predadores e fungos (Tambasco et al., 1997, 2001b). Essas importações colaboraram com a realização de vários projetos, não só de responsabilidade da Embrapa e Serviço Nacional de Pesquisa Agropecuária (SNPA), como também executados por universidades, instituições nacionais e internacionais, empresas e cooperativas de diversos segmentos produtivos (Tambasco et al., 2001b). Outrossim, contribuíram para viabilizar material para a composição de coleções de microrganismos-referência para estudos taxonômicos e biológicos, entre outros (Tambasco et al., 2001b).

O aumento de demandas de processos de importação com a participação da EQ do LQCL deu-se conforme o impacto positivo das liberações inundativas de agentes de controle biológico disponibilizadas ao segmento produtivo, muitas das quais resultaram também na maior aceitação e uso da técnica de controle biológico clássico no país (Sá et al., 2000d, 2016a; Tambasco et al., 2001b; Parra et al., 2002a, 2002b; Oliveira et al., 2001; Oliveira; Paula, 2002; Oliveira; Sá, 2006; Sá; Oliveira, 2006; Parra; Pinto, 2016; Bueno; Lenteren, 2016; Sá; Pessoa, 2015; Sá, 2017). Do mesmo modo, essa elevação de serviços pode ser justificada pela evolução gradativa da disponibilização

de métodos de padronização nacional e internacional de introdução e de análise de risco e impacto ambiental de liberações de agentes de controle biológico (De Nardo et al., 1994, 1995a, 1995b, 1998, 1999a, 2000; Lucchini et al., 1989; Costa; De Nardo, 1998; De Nardo; Grewal, 2000; Moraes et al., 1995, 1996, 1997; FAO, 1996, 1997, 2005a, 2005b, 2006; Capalbo; Sá, 1998; Sá et al., 1999c, 2010b, 2011, 2014, 2016; Sá, 1994, 1997, 2003, 2004; Sá; Lucchini, 2009; Coutinot et al., 2013; Sawazaki et al., 2013, entre outros). Muitos desses métodos foram disponibilizados a partir do Projeto Biocontrole clássico de pragas, doenças e plantas invasoras em ecossistemas (Embrapa SEG 02.2000.456) do LQCL, de 2000, cujo objetivo foi prevenir possíveis efeitos indesejáveis ao ambiente em decorrência de introduções de agentes de controle biológico exóticos no país e prospectar inimigos naturais eficientes ao controle de pragas. Esse projeto também viabilizou protocolos e atuou nos trabalhos técnicos realizados na EQ do LQC, incluindo na emissão de pareceres técnicos que, à época, eram necessários para subsidiar a tomada de decisão do Mapa na emissão do “Permit” (permissão de importação/exportação) das solicitações recebidas para realização de introduções/exportações dos organismos benéficos no país. Ainda nas atividades desse projeto, a equipe também monitorava e/ou registrava informações dos organismos pós-liberação da quarentena (por período de 2 anos), também requisitado pelo Mapa à época. Nesse projeto, bases de dados sobre controle biológico clássico no Brasil e sobre as introduções dos agentes de controle biológico realizadas também foram mantidas atualizadas, bem como informações sobre as legislações nacionais e internacionais de intercâmbio de bioagentes vigentes. O projeto também apoiava as atividades realizadas pelo “Comitê de Sanidade Vegetal do Cone Sul” (COSAVE), por meio da participação de pesquisadores do LQCL no “Grupo de Trabalho Permanente em Controle Biológico” (GTP-CB), subsidiando-o para a elaboração de regulamentações na área de controle biológico, lista de pragas de importância quarentenária para fins de controle biológico, entre outras demandas. Também promoveu e realizou treinamentos na área de controle biológico, análise de risco, biossegurança, curadoria de museus e legislações aos técnicos do Mapa, sempre que solicitado.

Desse modo, desde seus primeiros anos de existência, a EQ do LQCL contribui com as ações de vigilância e controle fitossanitário do Mapa, também expedindo alertas quarentenários, tais como os realizados em 1998 solicitados para a PQA cochonilha rosada *Maconellicoccus hirsutus* (Green) (Hemiptera: Pseudococcidae) que, à época, já se encontrava na América do Sul (Guiana) (Alerta quarentenário... 1998a, 1998b, 1998c; Tambasco, 1998). Para este inseto-praga vários outros trabalhos foram elaborados e disponibilizado por pesquisadores do LQCL e parceiros, indicando também as estratégias para monitoramento e detecção desta cochonilha, desde que identificada no entorno da área nacional (De Nardo; Tambasco, 1998; De Nardo et al., 1999b; Tambasco et al., 2000, 2001a; Barbosa; Sá, 2003; Marsaro Júnior et al., 2007).

Tratava-se de uma praga altamente polífaga, capaz de provocar danos da ordem de US\$ 3,5 a 125 milhões ao ano e de atacar várias culturas, incluindo algodão, milho, café, feijão, fruteiras (coco, citros, goiaba, graviola, coco, uva), cacau e flores e plantas ornamentais (roseira e hibiscos). Posteriormente, também no âmbito do projeto Embrapa SEG 02.2000.456, o LQCL disponibilizou na Internet, em site hospedado pela Embrapa Meio Ambiente, informações sobre essa mesma cochonilha (Embrapa Meio Ambiente, 2000), minimizando o uso de recursos financeiros para a elaboração de materiais impressos e ampliando a difusão da comunicação nacional sobre aspectos da biologia do inseto, de procedimentos para sua correta identificação e daqueles a serem realizados em caso de detecção da praga no país. O LQCL também disponibilizou ao Mapa informações sobre a viabilidade de uso de populações da joaninha australiana (ou joaninha-da-cabeça-vermelha) *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant (Coleoptera: Coccinellidae) no controle biológico clássico (CBC) da cochonilha rosada, ainda quando esse predador se encontrava recém-introduzido no país (em fevereiro/1998). Esse material, vindo do Chile, estava sendo acompanhada pela EQ em processo de importação, autorizado pelo Mapa, solicitado pela Embrapa Mandioca e Fruticultura para pesquisas para o controle da cochonilha-dos-citros *Ortezia praelonga* Douglas (Hemiptera: Orthezidae) (Tambasco et al., 2001b). Esse predador, com capacidade de ingerir 3-5 mil cochonilhas em diferentes fases de desenvolvimento da praga, foi apontado como promissor também ao controle da cochonilha rosada e encontrava-se ainda disponível na EQ do LQCL, em caso de interesse em testes de uso no controle oficial. Infelizmente, essa opção de controle biológico de *M. hirsutus* não foi considerada nas estratégias quando confirmada a presença da praga no país, que em anos seguintes se tornou de importância econômica (IN n. 59 de 18/12/2013). Outras atividades de pesquisas com *C. montrouzieri* foram realizadas, as quais serão tratadas nas próximas seções deste capítulo.

Quando considerado todo o período de existência da EQ do LQCL (1991 até julho/2021), foi observada elevação na quantidade de remessas de espécies avaliadas nos processos de importação oficiais do Mapa, constatando-se o predomínio de introduções de fungos, bactérias, parasitoides e ácaros predadores (Tambasco et al., 2001b; Sá; Pessoa, 2015; Sá, 2017). Nesse mesmo período, o LQCL também atuou na quarentena de processos de exportação de várias espécies de organismos benéficos, prevalecendo parasitoides e ácaros predadores (Moraes et al., 1997; Tambasco et al., 2001b; Sá; Pessoa, 2015; Sá et al., 2016a; Sá, 2017). Como um exemplo de atividade técnica realizada por pesquisadores do LQCL com foco em processos de exportação de potenciais bioagentes de controle, cita-se a participação nos estudos técnicos conjuntos com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA), para avaliar potenciais inimigos naturais da formiga lava-pé *Solenopsis* sp. (Hymenoptera: Formicidae). Estes estudos identificaram moscas da família Phoridae como alternativas ao

controle biológico clássico dessa praga nos EUA e avaliaram o impacto dessa introdução em polinizadores (Porter; Sá, 1998; Sá; Porter, 1998; Porter et al., 1999a, 1999b). Outros serão detalhados em sessões deste capítulo.

Apesar do aumento elevado no número de processos atendidos pela EQ do LQCL, a realização de reformas de reestruturação do seu prédio, para adequá-lo na última década aos requisitos de implantação de normas de qualidade na Embrapa Meio Ambiente, resultaram na indisponibilidade temporária desse serviço técnico nacional e na redução da sua área inicial disponível; cujas áreas retiradas foram destinadas à ampliação do LEF. Constatou-se também, de 2015 a julho/2021, a redução nos serviços quarentenários prestados pelo LQCL, principalmente em decorrência de credenciamentos de outras estações quarentenárias no país, realizados em 2016 pelo Mapa para processos tratando de microrganismos, e por aspectos legais vigentes (relacionados ao Conselho de Gestão do Patrimônio Genético- CGEN, do MMA). Mesmo assim, neste período, a EQ do LQCL atuou em vários processos de introdução de espécies exóticas de organismos benéficos visando ao controle biológico de pragas, prevalecendo importações de bactérias, fungos e parasitoides. Ainda em apoio às atividades de sanidade vegetal envolvendo pragas quarentenárias, exóticas e nativas e, portanto, com potenciais demandas futuras de CBC, mencionam-se as participações do LQCL e LEF na proposta de temas técnicos para composição da carteira do Arranjo Sanidade Vegetal, liderado pela Embrapa Mandioca e Fruticultura. Acrescenta-se ainda a contribuição técnica do LQCL na construção do Arranjo Quarentena, liderado pela Embrapa Roraima, tanto na elaboração do projeto do arranjo, quanto como membro de seu comitê gestor. Neste arranjo, o LQCL também ofereceu temas para a carteira de projetos, participando dos demais trabalhos técnicos realizados. Mais tarde, o arranjo tornou-se Portfólio Quarentena e, em seguida, foi incorporado ao Portfólio Sanidade Vegetal, por reestruturação interna da Embrapa. Registraram-se, portanto, as contribuições técnicas da Embrapa Meio Ambiente nesses importantes fóruns norteadores de carteiras de projetos da Embrapa no tema pragas quarentenárias e controle biológico, incluindo clássico.

A extensa lista de PQA e a quantidade reduzida de recursos para avaliá-las em atividades de pesquisa, concomitantemente ao aumento de registros de interceptações de insetos exóticos, são problemas para se estabelecer estratégias de defesa vegetal em vários países, inclusive no Brasil. Por essa razão, várias iniciativas mundiais voltaram-se para a priorização de PQA e para disponibilizar métodos para melhor selecioná-las pelo grau de risco oferecido ao país. Nesse contexto, o DSV/SDA/Mapa e a Embrapa realizaram em 2016 atividades de priorização de PQA do Brasil, adotando o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (Barbosa et al., 2017). Dois pesquisadores do LQCL, membros do Arranjo Quarentena, participaram de duas etapas desse trabalho. Na primeira, um deles participou do grupo de trabalho das priorizações de PQA e

de identificação de critérios de importância e prioridade para a realização de análises posteriores, que permitiram classificar essas pragas de acordo com o risco em cada critério acordado (Barbosa et al., 2017). Na etapa posterior, realizada ainda em 2016, os dois pesquisadores do LQCL participaram da atividade de “análise de resultado para estabelecimento e dispersão” de cada uma das 20 pragas priorizadas, contribuindo com parte desta análise (Fidelis et al., 2018b). Desse modo, a Embrapa Meio Ambiente contribuiu para a priorização final dessas PQA (Fidelis et al., 2018a). O resultado da priorização auxiliou tanto a determinação de estratégias de fomento aos projetos de arranjos da Embrapa, quanto subsidiou o estabelecimento de planos de Defesa Vegetal do Mapa, com foco em vigilância e contingência de pragas quarentenárias de importância econômica para o país.

Nesse contexto, a Embrapa Meio Ambiente vem tendo também atuação proativa com foco em patógenos vegetais, por meio de interação com instituições de diversas regiões do país e membros do Mapa. O apontamento de ocorrências de novas associações entre patógenos e diferentes espécies vegetais fornecem suporte à vigilância fitossanitária, sendo aspecto importante para que as ações emergenciais de contenção de novas pragas sejam providenciadas em tempo hábil, caso seja avaliado risco iminente às culturas de importância econômica. Ocorrências de patógenos importantes, que causam impacto, vêm sendo relatadas por pesquisadores da Unidade. Dentre as mais recentes, destaca-se a incidência de *Rhizoctonia solani* em diferentes culturas. Em especial no estado do Acre, a elucidação do agente causal da queima da teia micélica em mandioca é um exemplo de trabalho em que a cooperação, entre pesquisadores da Embrapa Acre, Embrapa Meio Ambiente e Mapa, contribuiu para a mitigação das ameaças ocasionadas por este patógeno. Na região, esta cultura é de grande importância a produtores de diversos perfis, de interesse como cultura de subsistência ou de valor comercial. Após longo período de indefinição do agente causal de uma queima intensa, observada em cultivos de mandioca, e da elucidação de *R. solani* como patógeno responsável pelas perdas decorrentes da sua incidência (Siviero et al., 2019), o direcionamento de medidas de manejo integrado e ações de pesquisa puderam ser direcionados com maior efetividade para mitigar os problemas ocasionados pela sua presença. Já na região Nordeste, a definição de *Geotrichum candidum* como agente causal da podridão-azeda em meloeiro (Halfeld-Vieira et al., 2020) pode auxiliar na tomada de medidas mais adequadas ao seu manejo, reduzindo o risco do uso indiscriminado de fungicidas ineficientes para o seu controle em pós-colheita. Já em plantas ornamentais, a definição da ocorrência de *Myrothecium roridum* (= *Paramyrothecium roridum*) como agente causal de manchas foliares em plantas de begônia (Fujinawa et al., 2016) levou à busca de alternativas de manejo capaz de reduzir a exposição de produtores a agrotóxicos, além de menor impacto ao meio ambiente. Um estudo envolvendo um método de controle utilizando os fungos *Trichoderma asperellum* e *Clo-*

*nostachys rosea* (Fujinawa et al., 2020) propiciou alternativa para adoção de práticas de controle biológico, capazes de reduzir as perdas neste sistema de produção. Outros exemplos de colaboração de identificação de agentes causais de doenças, com associações até então inéditas no país, também podem ser mencionados (Melo et al., 2018a), incluindo o relato de novas espécies de patógenos fúngicos (Boari et al., 2017; Soares; Nechet, 2017; Boari et al., 2018; Halfeld-Vieira et al., 2012; Melo et al., 2018b; Quadros et al., 2019; Batista et al., 2020; Nakasone et al., 2020).

No âmbito internacional, pesquisadores do LQCL continuaram atuando na colaboração com o COSAVE, iniciada em 2000, onde em anos mais recentes dois deles foram empossados pelo Mapa como delegados brasileiros do Grupo de Controle Biológico. Extensas contribuições técnicas internacionais foram realizadas, tanto para a permanência e capacitação de pesquisadores do LQCL em temas de interesse nacional, realizadas em importantes centros de pesquisa do exterior, quanto no recebimento de pesquisadores estrangeiros na Unidade, com o mesmo fim.

Além dos vários serviços quarentenários prestados, pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente também realizaram estudos em projetos de pesquisa que envolveram a introdução de organismos benéficos para o controle biológico clássico e a busca por maior conhecimento sobre essas espécies importadas, manutenção de colônias e monitoramento de suas liberações no território nacional. Essas atividades também foram direcionadas para exportações de organismos benéficos relacionados ao controle biológico clássico. Alguns exemplos serão citados a seguir.

## PROSPECÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE PRAGAS

Para subsidiar o conhecimento sobre potenciais inimigos naturais promissores ao uso no controle biológico clássico do país, as atividades de pesquisa do LQCL também foram direcionadas para melhor entender características biológicas de insetos pragas exóticos e quarentenários, como também de seus cultivos hospedeiros e de seus potenciais agentes de controle biológico exóticos. Nesse contexto, várias atividades de pesquisa exploratória realizadas pelo LQCL envolveram o levantamento dessas informações e subsidiaram a posterior definição de métodos e desenvolvimento de tecnologias (Bancos de Dados e Sistemas Informatizados) para organizar e mais rapidamente recuperar esse *know-how* ou priorizar insetos-pragas para atividades de pesquisas (De Nardo et al., 1994; Pessoa et al., 2010a, 2010b, 2010c; Sá et al., 2014a). Como alguns exemplos, citam-se resultados obtidos pelo Projeto Levantamento de possíveis bactérias antagonistas à *Xanthomonas campestris* pv. *citri* tipo A no filoplano de plantas cítricas (Embrapa SEG 39868013), de 1987 (cujo nome atualizado da bactéria é *Xanthomonas citri* subsp. *citri*); pelo Projeto Levantamento de parasitoides do bicudo e estudos de algumas características da comunidade (Embrapa SEG 34878038), de

1988; e pelo Projeto Levantamento de algumas espécies e pragas da mangueira e seus inimigos naturais (Embrapa SEG 39888037) de 1989; todos da Embrapa Meio Ambiente e que já se propunham, à época, à realização de estudos de prospecção.

Esses alicerces prévios e necessários para estudos de investigação, identificação de lacunas no conhecimento para a prospecção de novos projetos de pesquisa e para a identificação de pragas polífagas ou de maior severidade aos cultivos nacionais foram imprescindíveis para o avanço do conhecimento. Essas atividades permitiriam prospectar demandas futuras para a EQ do LQCL e pesquisas, sejam as abordadas diretamente em projetos da Embrapa Meio Ambiente ou de parceiros, como para aquelas induzidas pela Embrapa, em seus projetos estratégicos, ou pelo Mapa, em suas ações de vigilância, capacitação e controle com foco na defesa agropecuária brasileira. Várias ações relativas a este tema foram coordenadas ou realizadas por pesquisadores do LQCL/LEF (De Nardo et al., 1994; Pessoa et al., 2010a, 2010b, 2010c; Lourenço et al., 2012; Laranjeira et al., 2016; Fidelis et al., 2018b).

Utilizando recursos computacionais e rede internet, à época ainda poucos explorados pela Embrapa, o LQCL fez com que a Embrapa Meio Ambiente também se destacasse e avançasse no uso de tecnologias da informação aplicadas ao controle biológico de pragas. Em 1994, De Nardo et al. (1994) disponibilizaram um banco de dados sobre análise de risco e impacto ambiental de liberações de agentes de controle biológico, enquanto iniciaram a organização das informações já levantadas para desenvolver e disponibilizar o Sistema de Informação Internacional sobre controle biológico de pragas para internet (Biocontrol-L), acessado à época no site [cnpma.embrapa.br/biocontrol](http://cnpma.embrapa.br/biocontrol/)<sup>1</sup> (Moraes et al., 1995; Sá et al., 1996, 2000a). O Biocontrol-L foi coordenado e mediado por pesquisador do LQCL, que identificou outros pesquisadores, nacionais e internacionais, interessados em participar dessa rede de informações e discussões no tema controle biológico, disponibilizando uma base de referência de pesquisadores para colaboração mútua neste tema. O Biocontrol-L também propiciou o levantamento e organização de várias estratégias de controle biológico de pragas, em uso no país e no exterior (Sá, 2004). Porém, esse sistema foi sendo gradativamente desativado pela Embrapa Meio Ambiente, para que, em anos mais recentes, seu conteúdo passasse a contribuir com a moderna estrutura de Plataforma Digital da Embrapa. Assim, todo o conhecimento adquirido e depositado no sistema Biocontrol-L até 2014 foi repassado para o projeto NATDATA (Embrapa SEG 02.10.04.002.00.00), liderado pela então Embrapa Informática Agropecuária (atual Embrapa Agricultura Digital) de 2011 a 2014, pela participação do coordenador do Biocontrol-L como responsável da atividade Inimigos naturais de insetos pragas no Brasil do plano de ação Organização

---

<sup>1</sup> Site atualmente desativado.

e Integração das Bases de Dados de Coleções Biológicas da Embrapa (Embrapa SEG 02.10.04.002.00.05), de responsabilidade da Embrapa Acre.

O LQCL também liderou o projeto Desenvolvimento de métodos e aplicativos para sistemas quarentenários em apoio à defesa agropecuária nas culturas de citros, cana-de-açúcar, eucalipto e flores/plantas ornamentais no estado de São Paulo (CNPQ 578283) (Embrapa SEG 03.09.059.00.00- Processo 578383/2008-05/Edital CNPq/Mapa n. 64/2008). O objetivo principal desse projeto foi o desenvolvimento de métodos e aplicativos que contemplassem formas de prevenção/controle/erradicação de pragas quarentenárias de citros, cana-de-açúcar, eucalipto e flores/plantas ornamentais e o intercâmbio internacional de plantas e de bioagentes de controle, em apoio à defesa agropecuária no estado de São Paulo. Executado de 2009 até a metade de 2011, em parceria de pesquisadores da APTA (Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e Instituto Biológico (IB)) e da Faculdade de Ciências Agrônomicas (FCA)/Universidade Estadual Paulista (Unesp) campus Botucatu, disponibilizou vários sistemas informatizados e informações de importância aos seus objetivos específicos (Stivanelli et al., 2009; Mazuchi et al., 2010; Pessoa et al., 2010a, 2010b, 2010c; Carvalho et al., 2010; Giraldi et al., 2011a, 2011b, 2012; Lazarin et al., 2011a, 2011b, 2012; Sawazaki et al., 2010, 2011a, 2011b; Siqueira et al., 2011; Sá et al., 2014a). O sistema informatizado SysRiskQuarantine (Sá et al., 2014a), desenvolvido por pesquisadores do LQCL neste projeto, integrou vários outros sistemas igualmente desenvolvidos pelo LQCL no âmbito das suas atividades no projeto, visando disseminar rapidamente, por acesso via Web, os resultados gerados (Giraldi et al., 2011b). Contemplou o Sistema de monitoramento em campo de pragas de eucalipto por cartão amarelo – MonitCartão (Lazarin et al., 2012; Sá et al., 2014a), o Sistema de Gerenciamento de processos de introdução e pesquisas de pragas quarentenárias e bioagentes de controle do LQC – GerProcQuarentena (Giraldi et al., 2012; Sá et al., 2014a), o Sistema de estimativa de fases ninfais do psilídeo-de-concha por amostragens de tamanhos de concha – ContaConcha (Sá et al., 2014a), o Bancos de dados bioecológicos com informações das principais pragas e inimigos naturais, bem como identificação de áreas de cultivo no estado de São Paulo, das culturas de citros, cana-de-açúcar, eucalipto e flores/plantas ornamentais, e de seus principais fatores abióticos municipais (Mazuchi et al., 2010; Giraldi et al., 2011a; Sá et al., 2014a) e o Banco de dados de pragas quarentenárias ausentes (A1) e presentes (A2) com base na IN SDA/Mapa n. 41 de 01/julho/2008 (Pessoa et al., 2010a; Giraldi et al., 2011b; Sá et al., 2014a). O Banco de dados de PQA (antes A1) e PQP (antes A2) disponibilizou parte das informações levantadas sobre essas pragas exóticas com foco em seus cultivos hospedeiros, até então dispersas ou indisponíveis para acesso público e de pesquisa, abordando a quase totalidade das pragas citadas na IN n. 41 (pendente apenas para plantas infestantes) até o término do projeto em 2011; tendo tido nesse mesmo ano, nomes científicos, classificadores e ordem e família validados por entomologistas e fitopato-

logista do LQCL. Desse modo, possibilitou identificar os organismos exóticos com potencial de ataque aos cultivos-alvos do projeto. Apesar do SysRiskQuarantine ter tido seu desenvolvimento descontinuado (não aprovação de prorrogação do projeto), as informações já oportunizadas em suas bases de dados permitiram atualizar as bases do BioControl-L e, portanto, contribuir com o Projeto NATDATA citado. Além disso, as informações do SysRiskQuarantine também foram utilizadas, posteriormente, em atividades do Subgrupo “Citros” do Mapa/UTRA-Campinas e nas estratégias da Embrapa utilizadas para contenção da praga quarentenária *Helicoverpa armigera*; ambas, realizadas em 2013, serão mais bem apresentadas em seções específicas deste capítulo.

Ainda no contexto do desenvolvimento de bases de dados com foco na incorporação em plataformas digitais da Embrapa, citam-se aquelas elaboradas para tornar disponível a consulta de imagens de sintomas de doenças, que também demandam a verificação e disponibilização de imagens e dados seguros fornecidos por especialistas. Essas imagens podem ser utilizadas em diversas finalidades, sejam direcionadas para fins acadêmicos ou como base de comparação para usuários terem maior suporte nos trabalhos de diagnose. A base Digipathos<sup>2</sup> é um repositório da Embrapa de livre acesso, que foi elaborada com a participação colaborativa de diversas unidades da Embrapa, incluindo dois fitopalogistas da Embrapa Meio Ambiente (Barbedo et al., 2018). Disponibiliza uma base de suporte para desenvolvimento futuro de uma plataforma, que permita realizar o diagnóstico automático de doenças de plantas por meio de imagens digitais. A ideia primária da construção da base Digipathos foi, a partir das suas imagens, viabilizar o desenvolvimento de algoritmos capazes de detectar padrões inerentes às imagens de plantas sintomáticas, até que se alcance significativa acurácia na diagnose oferecida. Embora tenha sido constituída por imagens de doenças que já ocorrem no país, ela também apresenta potencial para, futuramente, apoiar a detecção de doenças quarentenárias, a partir da inclusão de imagens de doenças de plantas sintomáticas capturadas em países de respectivas ocorrências. Ferramentas como esta são de grande importância para apoiar estratégias de monitoramento local e de rápida detecção de presença no país, subsidiando a tomada de decisão das ações de contenção e erradicação antes que o organismo se estabeleça e/ou disperse nas mais diversas regiões.

Mais recentemente, os projetos Identificação de agentes causais de doenças com alta severidade observadas em macadâmia e Levantamento da entomofauna associada presente e identificação de insetos-pragas exóticos ausentes com potencial de dano ao cultivo da macadâmia (Embrapa SEG 30.19.90.011.00.00 e 30.19.90.012.00.00, respectivamente; Acordo de Cooperação Técnica EMBRAPA e QueenNut Indústria

---

<sup>2</sup> Disponível em: <https://www.digipathos-rep.cnptia.embrapa.br/>

e Comércio Ltda. (Contrato SAIC 21300.19/0072-1; prorrogado até 2024)) vêm sendo realizados por pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente e QueenNut, com alvo em levantamentos de pragas do cultivo de macadâmia. O projeto foi apresentado por pesquisadora do LQCL em novembro/2019 na 1ª Conferência Internacional Anual de Pesquisa e Desenvolvimento sobre Macadâmia, em Lincang, China, oportunizando contatos e colaborações internacionais. Os levantamentos de entomofauna presente e pragas exóticas ausentes identificaram e estudam pragas exóticas ausentes de importância ao cultivo de macadâmia, considerando ocorrências nas principais áreas produtoras do exterior, como também cultivos hospedeiros localizados no entorno da área-alvo do projeto (Município de Dois Córregos, SP). Entre os insetos-praga exóticos levantados já foram identificadas 19 PQAs, além de microrganismos exóticos de interesse (sendo alguns quarentenários). Áreas nacionais, bem como aspectos bioecológicos e de controle (químico e biológico), entre outros de interesse a vigilância fitossanitária desses insetos exóticos estão sendo identificados; já disponibilizados para três pragas exóticas, a saber *Scirtothrips dorsalis* (Pessoa et al., 2022a; Mingoti et al., 2023a), *Cryptophlebia ombrodelta* (Mingoti et al. 2023c) e *Amblypelta nitida* (Pessoa et al., 2022b; Mingoti et al., 2023b), sendo as duas primeiras PQA. Amostragens de campo vem sendo realizadas na área-alvo, onde aquelas já efetuadas desde março/2020 viabilizaram levantamentos de insetos presentes, parte deles disponibilizados (Ferrari et al., 2021) e quantificados e classificados para subsidiar estratégias de manejo.

Ainda no contexto de prospecção de estratégias de controle de pragas exóticas, pesquisadores do LQCL contribuíram em maio/2017 com a agenda de prioridades da Embrapa, disponibilizando nota técnica no “Observatório do Meio Ambiente” da Rede Agropensa da Embrapa (Pessoa et al., 2017). Nela, a importância da realização de pesquisa exploratória sobre pragas quarentenárias ausentes e exóticas não regulamentadas de potencial importância econômica para as principais *commodities* brasileiras foi evidenciada com foco na análise de tendência de comportamento, estabelecimento e controle dessas pragas exóticas (Pessoa et al., 2017). Também apontaram perda de US\$ 1,7 bilhão aos cofres nacionais decorrentes da entrada do inseto-praga *Helicoverpa armigera* Hubner (Lepidoptera: Noctuidae), de US\$ 125 milhões pelo ingresso da doença ferrugem-da-soja, *Phakopsora pachyrhizi* Sidow (Pucciniales: Phakopsoraceae) e a elevação de custos de controle da ordem de 25-30% em plantios do Cerrado em decorrência da ressurgência de danos do bicudo-do-algodoeiro, *Anthonomus grandis* Boheman (Coleoptera: Curculionidae), evidenciando que além dos danos diretos, o impacto destrutivo da entrada dessas pragas exóticas no país foi refletido não só na cadeia produtiva das culturas atacadas, mas nas consequências econômicas e sociais de todo o país. De igual modo, também sinalizaram os benefícios decorrentes, já comprovados no exterior, de investimentos realizados na pesquisa preventiva (Navia, 2015;

Maldivas, 2015; Austrália, 2017; University of California Riverside, 2017), quando comparadas àquelas necessárias de serem realizadas pós ingresso de pragas exóticas, no intuito de erradicação, contenção ou alternativas de manejo no país. Vários projetos de pesquisa e atividades em agendas gerenciais estratégicas locais da Embrapa Meio Ambiente e Embrapa Territorial no INTEGRO Embrapa, como outras autorizadas pela Unidade, contaram com a participação ou liderança de pesquisadores do LQCL e LEF tratando desse tema e considerando pragas agrícolas e florestais; parte deles serão apresentados a seguir, no contexto desses cultivos.

## ESTRATÉGIAS DE CONTROLE BIOLÓGICO DE INSETOS-PRAGAS DE IMPORTÂNCIA PARA A FRUTICULTURA

Para se entender a importância do segmento produtivo da fruticultura do país, quando consideradas a produção nacional de manga em 2020, somente o Vale do São Francisco (VSF) (Bahia/Pernambuco) foi responsável por 49 mil ha, com registros de áreas expressivas também em Livramento de Nossa Senhora (BA) com 12.122 ha, no interior de São Paulo (7.840 ha) e no Norte de Minas Gerais (7.750 ha) (Hortifruti Brasil, 2021). Nas exportações de manga, observou-se uma elevação do volume exportado em 2001 de 94.096.146 kg (no valor de US\$ 50.713.624) para 243.225.863 kg em 2020 (no valor de US\$ 247.417.201) (Embrapa, 2021). Quando considerada uva fina de mesa, o VSF novamente é destaque, com produção em 11.500 ha em 2020, seguido pelas regiões de Pilar do Sul (São Paulo) com 456 ha e de Maringá, Marialva e Cornélio Procópio (Paraná) com 720 ha; entre outras produtoras de uva Niágara (em Pirapora (MG), Campinas e Porto Feliz (SP)), de uva fina e Niágara (em Jales e São Miguel Arcanjo (SP) e outros municípios produtores no Paraná) e de uva para indústria (no Rio Grande do Sul com 44 mil ha) (Hortifruti Brasil, 2021). Já para citros, somente os estados de São Paulo e o Triângulo Mineiro apresentaram 395,671 mil ha em 2020/2021 e responderam por 423,65 mil toneladas (volume em equivalente concentrado) de julho a novembro/2020, correspondendo a uma receita de US\$ 614,9 milhões (Hortifruti Brasil, 2021). Ainda em 2020, as áreas com cultivo de mamão foram significativas no Norte do Espírito Santo (5.000 ha), Sul e Oeste da Bahia (com 4.500 ha e 1.860 ha, respectivamente), Norte de Minas Gerais (3.000 ha) e Rio Grande do Norte (1.525 ha). Nesse contexto produtivo, nota-se que o impacto da presença de insetos-pragas, tais como de moscas-das-frutas, nas fruteiras presentes em importantes polos produtores nacionais não somente acarretariam problemas diretos às exportações brasileiras (mesmo em populações em baixos níveis), como também interfeririam na disponibilidade interna desses produtos e na manutenção de empregos diretos e indiretos gerados por essas cadeias produtivas e comerciais, presentes nas diferentes áreas do país.

Além das moscas-das-frutas existentes no país, as INs do SDA/Mapa apresentando as PQA e PQP, e suas atualizações, listam várias espécies exóticas de moscas-das-frutas, entre outros insetos com potencial de atacar fruteiras comerciais no Brasil, sendo um grande desafio para a pesquisa agropecuária investigá-las para a busca de estratégias de prospecção de mecanismos preventivos a um possível ingresso no país e/ou para organizar e disponibilizar conhecimento pré-existent no exterior sobre alternativas de controle passíveis de uso no território nacional.

Entre as moscas-das-frutas de importância econômica (IE) para fruteiras de diferentes regiões do Brasil, citam-se as da família Tephritidae, tais como a mosca-das-frutas-sul-americana *Anastrepha fraterculus* (Wiedemann), a mosca-das-cucurbitáceas-sul-americana *Anastrepha grandis* (Macquart), mosca-das-frutas-do-oeste-indiano *Anastrepha obliqua* (Macquart) e a mosca-das-frutas-do-mediterrâneo *Ceratitis capitata* (Wiedemann), e a da família Drosophilidae, denominada drosófila-da-asa-manchada *Drosophila suzukii* (Matsumura). Somente na safra 2020/2021, o impacto da presença de moscas-das-frutas e do bicho-furão para o cinturão citrícola gerou a redução de 4,29% frutas cítricas (Mosca-das-frutas..., 2021).

Com particular atenção para o controle biológico clássico de *Anastrepha* spp., em 1994, após consulta a especialistas americanos (USDA e Universidade do Texas), a Embrapa Mandioca e Fruticultura demandou, em processo de introdução junto ao Mapa, a importação do parasitoide de larvas *Diachasmimorpha longicaudata* Ashmead (Hymenoptera: Braconidae); em três remessas de material recebidas em 1994 no quarentenário do LQCL, sendo duas provenientes de Tapachula (México) e uma da Flórida (EUA) (Tambasco et al., 2001b). Nessa importação, o quarentenário realizou suas atividades para comprovação da espécie e segurança das remessas de materiais introduzidos no país. Após a liberação da quarentena (autorizada pelo Mapa), pupas desse organismo benéfico foram enviados pelo LQCL à Embrapa Mandioca e Fruticultura, para dar sequência aos estudos de avaliação do potencial uso desse parasitoide, conforme informado no processo oficial. Assim, pesquisas foram conduzidas naquela Unidade, em diferentes ecossistemas do Brasil, visando a implantação de um programa de controle biológico de mosca-das-frutas com a espécie de organismo benéfico introduzido, realizadas em conjunto com a Embrapa Clima Temperado, EPAGRI, CENA-USP e Instituto de Biociências/USP (Carvalho; Nascimento, 2001; Silva et al., 2005b). As pesquisas comprovaram a viabilidade de *D. longicaudata* no controle de *A. fraterculus* em diferentes frutíferas, como também, adiante, no controle de *C. capitata* (Walder et al., 1995; Carvalho et al., 1998; Carvalho, 2003, 2004; Silva et al., 2005b; Alvarenga et al., 2005; Meirelles et al., 2016; Coelho, 2017). Essa vespa parasitoide importada está atualmente registrada como BIOIN-LONGICAUD® (Empresa BIOIN) como agente de controle biológico de moscas-das-frutas junto ao Mapa. No mesmo período das pesquisas já informadas, Carvalho (2003) avaliou a

adaptação dessa espécie no município do Oiapoque, a partir de remessas de adultos de *D. longicaudata* enviadas pelo CENA-USP para o estado do Amapá em 2000 (Silva et al., 2005b), com objetivo de viabilizar essa estratégia de controle para o Programa Nacional de Erradicação da Mosca-da-Carambola, do Mapa (Silva et al., 2004, 2005b). Abordava-se, portanto, o controle para outra mosca-das-frutas da família Tephritidae, *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock; praga quarentenária presente (PQP). Não foi constatado impacto de *D. longicaudata* na fauna nativa, porém, baixos níveis de parasitismo foram obtidos, indicando necessidade de novos estudos de eficiência do parasitoide em pontos de liberação e o custo-benefício dessa alternativa de controle para o estado do Amapá (Silva et al., 2005b).

Desse modo, trabalhos de prospecção de potenciais bioagentes de controle nativos da mosca-da-carambola foram realizados pela Embrapa Amapá (Silva et al., 2005a, 2005b) e, em seguida, as atividades para a importação oficial do parasitoide ovo-larval *Fopius arisanus* (Sonan) (Hymenoptera: Braconidae) para o controle dessa PQP naquele estado, no âmbito do projeto Introdução do parasitoide exótico *Fopius arisanus* (Hymenoptera: Braconidae) no Brasil com vistas ao controle biológico de *Bactrocera carambolae* (Diptera : Tephritidae) – CBMC (Embrapa SEG 03.09.06.025.00.00) da Embrapa Amapá. Para essa introdução, uma visita técnica-oficial ao laboratório com a criação de *F. arisanus* em Hilo (Havaí, EUA) foi realizada por pesquisador do LQCL, para melhor conhecer técnicas de criação laboratorial e de liberações inundativas desse parasitoide. Assim, contribuiu no processo de importação de *F. arisanus* (21052.004662/2012-65), solicitado pela Embrapa Amapá, em 2012. Nesse processo, a EQ do LQCL recebeu três remessas do parasitoide, provenientes do Havaí em 2012 e 2013, para realização dos procedimentos quarentenários necessários. Autorizada a liberação da quarentena pelo Mapa em 2013, a espécie foi enviada para o demandante, que a encaminhou para a Embrapa Semiárido. Esta Unidade a multiplicou sobre o hospedeiro alternativo *C. capitata* e cedeu parte dessa colônia para estudos junto a empresa parceira, entre outros realizados (Paranhos et al., 2013; Sá et al., 2016a; Coelho, 2017).

Em seguida, vários estudos foram conduzidos em projetos da Embrapa (Embrapa SEG 02.14.01.17.00.02 e 03.16.00.072.00.00) para adequar a multiplicação desse parasitoide exótico sobre *C. capitata* (Groth et al., 2015; Costa et al., 2016), inclusive contando com uso da irradiação no hospedeiro antes do parasitismo, para obter uma criação sem a emergência da praga (Paranhos, 2017; Paranhos et al., 2021). Parte desse trabalho viabilizou o posterior envio de pupas parasitadas à Embrapa Amapá, em 2015, sem riscos de introdução de *C. capitata* naquele estado, onde até o momento estava livre dessa praga. Atualmente, *F. arisanus* está sendo criado pela Embrapa Amapá sobre *B. carambolae* (Pereira et al., 2015; Bariani et al., 2019; Paranhos et al., 2019), estando disponível para o controle da mosca-da-carambola nas áreas dos estados do Amapá,

Pará e Roraima, sob contenção do Mapa no Programa de Erradicação da Mosca-da-Carambola (PEMC). Vários projetos de pesquisa da Embrapa, entre outros estudos, deram continuidade à avaliação de comportamento e de prospecção de adaptação de *B. carambolae* no Amapá.

Em 2016, o LQCL, Embrapa Semiárido e Embrapa Territorial disponibilizaram, no âmbito de ação gerencial estratégica local (INTEGRO) da Embrapa Territorial, resultados de estudos de prospecção e de potencial adaptação de *B. carambolae* em áreas de dois distritos irrigados do VSF, a saber Bebedouro (em Petrolina/PE) e Mandacaru (em Juazeiro/BA), importantes áreas nacionais produtoras de fruteiras (Pessoa et al., 2016a). Os resultados obtidos indicaram a presença de condições particulares dessa região semiárida nacional, pelo microclima promovido nas áreas irrigadas pela irrigação por microaspersão, com potencial para favorecer o estabelecimento de *B. carambolae* nessas áreas produtoras, até então sinalizada como não-aptas à ocorrência do inseto, ressaltando a importância da manutenção das ações de contenção investidas pelo PEMC, realizado pela SDA/Mapa (Pessoa et al., 2016a). Estudos posteriores para essa PQP tiveram continuidade, após a aprovação prévia do SDA/Mapa do projeto Estratégias para subsidiar ações de monitoramento e controle de insetos-pragas presentes e quarentenárias ausentes no território brasileiro (DefesaInsetos) (Embrapa SEG 40.18.03.007.00.00) liderado pela Embrapa Meio Ambiente, contando com pesquisadores do LQCL e das Embrapa Territorial, Embrapa Amapá, Embrapa Semiárido e SFA/AP-Mapa. Além de *B. carambolae*, o projeto DefesaInsetos estudou outros insetos-pragas, a saber *Bactrocera dorsalis* Hendel (Diptera: Tephritidae) (PQA), *Anastrepha curvicauda* (syn. *Toxotrypana curvicauda*) Gerstaecker (Diptera: Tephritidae) (PQA), *Lobesia botrana* Denis & Schiffermüller (Lepidoptera: Tortricidae) (PQA), *Drosophila suzukii* Matsumura (Diptera: Drosophilidae) (IE) e *Aleurocanthus woglumi* Ashby (Hemiptera: Aleyrodidae) (IE)). Nesse projeto foram identificadas e informadas ao DSV/SDA/Mapa várias estratégias de controles (químicos e biológicos), informações bioecológicas dos insetos-pragas e de seus potenciais bioagentes de controle, além de zoneamentos territoriais de áreas brasileiras favoráveis aos seus respectivos estabelecimentos. Os tempos de desenvolvimentos e períodos de disponibilidade de fases dos ciclos dos insetos-praga e dos bioagentes também foram determinados, com base em estimativas numéricas e demandas térmicas, para subsidiar estratégias de controle biológico. Também foi realizada a identificação e seleção de princípios ativos (p.a.) adequados às pragas-alvos e à sustentabilidade ambiental de áreas nacionais, também orientados por potencial de transporte e por zoneamentos territoriais considerando áreas frágeis nacionais, disponibilizados pelo projeto. Os resultados obtidos apoiam as estratégias do Mapa para a identificação, monitoramento e manejo dos insetos-pragas exóticos abordados, sejam preventivos ou para atualizações daqueles já existentes no país. Parte dos resultados encontram-

se no site do projeto<sup>3</sup>. Destaca-se ainda que as espécies das PQA estudadas pelo DefesaInsetos estão entre as 20 PQA priorizadas em trabalho conjunto do DSV/SDA/ Mapa e Embrapa (Fidelis et al., 2018b), pela importância destas para as *commodities* agrícolas brasileiras. Desse modo, os resultados do projeto também contribuem para salvaguardar a sustentabilidade de áreas territoriais nacionais potencialmente favoráveis à presença dessas PQA priorizadas, disponibilizando informações e eventuais métodos de controle (incluindo biológico).

Alguns pesquisadores do LQCL/LEF também participam de projeto recente da Embrapa Territorial (Embrapa SEG n. 20.21.10.009.00.00), com financiamento de recursos de Termo de Execução Descentralizada (TED), em atividades que visam aprofundar estudos disponibilizados pelo Projeto DefesaInsetos, agora focando na indicação de prováveis rotas de risco de disseminação e/ou dispersão, de *B. carambolae* (PQP) e *L. botrana* (PQA).

Acrescentam-se ainda importantes ações, realizadas em 1999 com a participação de pesquisadores do LQCL, e que devem ser destacadas. Entre elas, as de controle de outras pragas de frutíferas do Polo de fruticultura do VSF, realizadas no Projeto Ecofrutas (do então Sistema Embrapa de Pesquisa (SEP): 11.999.239) e Projeto EcoFin (SEP: 11.999.222), que contou com captação financeira externa do Projeto EcoIso (PADFIN/VALEXPORT/CNPq) da Embrapa Meio Ambiente (Embrapa Meio Ambiente, 1999a, 1999b, 1999c). Nesses projetos, realizados em parceria com produtores da Associação dos Exportadores de Hortifrutigranjeiros e Derivados do Vale do São Francisco (VALEXPORT), com a Embrapa Semiárido e com a Secretaria do Desenvolvimento Rural do Ministério da Agricultura (SDR-MA), houve o desenvolvimento de métodos, protocolos de certificação e aplicativos para viabilizar a implantação e a elaboração de um Sistema de Acompanhamento da Produção Integrada (SAPI) de Frutas (PIF) de manga e uva de mesa para grandes e pequenos produtores da região do Submédio do VSF, bem como estudos que permitiram caracterizar e avaliar a qualidade ambiental da fruticultura irrigada no Nordeste Brasileiro e o impacto ambiental desses sistemas de produção nos recursos naturais locais (Silva et al., 2000; Pessoa et al., 2001). Assim, os pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente também disponibilizaram aos produtores dessas cadeias produtivas do VSF, informações sobre exigências fitossanitárias, nacionais e internacionais, para o controle de pragas e para viabilizar acesso e permanência de seus produtos nos mercados internacionais. No contexto desses projetos da Embrapa Meio Ambiente, três pesquisadores do LQCL também participaram das atividades de monitoramento e de identificação de pragas de importância para manga e uva de mesa, com foco nas

---

<sup>3</sup> Disponível em: <https://sites.google.com/view/defesainsetos/>

principais espécies de moscas-das-frutas, consideradas pragas-chaves, bem como pragas secundárias (cochonilhas, formigas, tripes, brocas, ácaros, entre outros), onde parte deles extrapolaram, posteriormente, suas atividades também para outras frutíferas locais, como goiaba, banana e coco, cultivadas por pequenos produtores (Pessoa et al., 2001). Desse modo, colaboraram na determinação de flutuações populacionais, na criação de manuais de identificação e de orientações de controle (Kit-Pragas), bem como com os protocolos das SAPI e das PI manga e PI uva de mesa, além dos cursos de formação de monitores e difusores ambientais locais (Pessoa et al., 2000, 2001). Os principais resultados desses projetos de produção integrada de manga e de uva foram disponibilizados em veículo de difusão inédito à época (CD-ROM), entregue pela Embrapa ao Ministro da Agricultura (Pessoa et al., 2000, 2001). Até, 2022 esse conteúdo foi também disponibilizado para acesso público *online*<sup>4</sup> em site da Embrapa Sede e Embrapa Meio Ambiente, socializando o acesso dessas informações aos diferentes elos das cadeias produtivas alvo e pesquisadores.

A partir de novembro de 1999, as ações de produção Integrada de manga e de uva conduzidas pela Embrapa Meio Ambiente, Embrapa Semiárido e Valeexport foram integradas às também já iniciadas para Produção Integrada de maçã, lideradas pela Embrapa Uva e Vinho e executadas em parceria com a Associação Brasileira dos Produtores de Maçã (ABPM). Desse modo, passaram a compor um único projeto da Embrapa, apresentado ao Mapa para viabilizar a primeira proposta de Produção Integrada de Frutas (PIF) no Brasil. No início de 2001, a elaboração da formulação das primeiras normas de PIF do Brasil foram iniciadas e pesquisadores da Unidade, incluindo do LQCL, integraram o comitê técnico responsável pela elaboração dessas normas; grupo este de responsabilidade do Mapa. A visibilidade desses resultados também subsidiou a participação técnica desses pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente no Convênio Internacional FAO-Embrapa, em 2002, para a criação de protocolos de Boas Práticas Agrícolas (*Good Agricultural Practices* (GAP) do *Production Systems* (PRODS)/*Priority Areas for Interdisciplinary Actions* (PAIA) da Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura (FAO)). Esses protocolos consideravam orientações de importantes protocolos internacionais, inéditos à época por terem foco na sustentabilidade ambiental do sistema produtivo (EurepGap, Unilever, EISA *Common Codex*, entre outros disponibilizados pelo *Development of a Framework for Good Agricultural Practices/Committee on Agriculture/FAO* Roma) e a Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC). O convênio internacional foi liderado pela Diretoria Executiva e Secretaria de Relações Internacionais da Embrapa e contou com a participação de pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, que ministrou curso interno à Embrapa, em 13/junho/2002 na

---

<sup>4</sup> Disponível em: [https://www.cnpma.embrapa.br/projetos/prod\\_int/item6.html](https://www.cnpma.embrapa.br/projetos/prod_int/item6.html)

Embrapa Sede, para nivelamento, sobre as exigências desses protocolos internacionais com foco na sustentabilidade ambiental, das Unidades descentralizadas participantes bem como dos demais participantes da Embrapa Sede e Universidade Nacional de Brasília (UNB). Posteriormente, a pesquisadora também colaborou na elaboração de parte dos protocolos, considerando os internacionais já citados, bem como na padronização dos demais e na apresentação destes em evento externo da Embrapa com a FAO (FAO, 2003). Esses protocolos resultantes das atividades do Convênio FAO/Embrapa, elaborados para as várias cadeias produtivas (frutas, carnes, hortaliças e grãos), foram disponibilizados como resultado esperado desse convênio (FAO, 2003).

Nesse mesmo período, pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente, entre eles do LQCL, contribuíram tecnicamente apresentando elementos de apoio às boas práticas agrícolas e sistema APPCC, considerando aspectos ambientais (Pessoa et al., 2004). Ainda para a fruticultura do Submédio São Francisco, pesquisadores da Unidade, incluindo do LQCL, também participaram do projeto Dinamização da rede de inovação tecnológica no Sub-Médio São Francisco - Fruticultura irrigada no polo agroindustrial de Petrolina-Juazeiro (SEG 020252000). O projeto foi realizado com o objetivo de dar continuidade ao atendimento aos requisitos de qualidade no seu sentido amplo (produto e meio ambiente), visando competitividade nos mercados.

Em se considerando pragas de cultivo de citros, o LQCL e LEF propuseram e participaram de vários projetos de pesquisa e ações integradas ao Mapa e importantes instituições de P&D nacionais, reconhecidas pela cadeia produtiva citrícola. Nesse contexto, pesquisadores do LQCL participaram de buscas exploratórias por inimigos naturais nativos para identificação daqueles com maior potencial de controle de pragas exóticas ingressas ao país (Sá et al., 2000d; Garcia et al., 2001; Silva et al., 2005a; Marsaro Júnior et al. 2006; Moraes et al., 2012).

Acrescentam-se os estudos conduzidos por pesquisadores da Unidade, entre eles do LQCL/LEF, envolvendo a praga conhecida por piolho-branco *Orthezia praelonga* Douglas (Hemiptera: Sternorrhyncha: Ortheziidae), uma das espécies exóticas mais danosas à citricultura nacional. O primeiro surto dessa cochonilha deu-se no Rio de Janeiro, RJ, a partir de plantas infestadas em 1943 (Robbs, 1947, citado por Cesnik; Ferraz, 2000), estando hoje presente em todos os estados brasileiros (Ortézia..., 2021). O fungo entomopatogênico *Colletotrichum gloeosporioides* Penz (reclassificada a partir de *Fusarium* sp.), isolado de *Orthezia* em folhas de *Coccoloba* sp. coletadas no Rio de Janeiro propiciaram redução da área infestada com a praga (66-84%), em pouco mais de um mês após aplicação (Cesnik; Ferraz, 2000). Os estudos também indicaram condições particulares, que conferiram patogenicidades indesejadas, sinalizando a necessidade de precauções no uso de isolados de *C. gloeosporioides* no controle biológico, pelo dano passível de ocorrência em plantações vizinhas às de citros quando utilizado nesta última (Cesnik; Bettiol, 1998; Cesnik; Ferraz, 2000).

Em 1998, o predador exótico denominado joaninha australiana *C. montrozieri*, cujo processo de importação já foi citado anteriormente nos serviços quarentenários do LQCL, foi introduzido no Brasil para disponibilizar opção ao controle de *O. praelonga*. A colônia desse predador foi mantida, em seguida, em abóboras infestadas com *Planococcus citri*, em laboratório da Embrapa Mandioca e Fruticultura. *Cryptolaemus montrozieri* foi distribuída pela Embrapa Mandioca e Fruticultura para a Manecol/SP (maio/2000-2001) e Endagro/SE, para ser utilizada em cultivo protegido (2003), bem como para a Embrapa Semiárido (2008 e 2010), para pesquisa no controle da cochonilha da palma forrageira (Embrapa SEG 02.07.01.012.00.00; com financiamento da Finep), e para Universidade Estadual de Londrina (UEL)/PR e Universidade Federal de Lavras (UFLA)/MG em 2011. Estudos continuaram sendo conduzidos e avaliando *C. montrozieri* (Dantzger et al., 2009; Sanchez; Carvalho, 2010; Lima et al., 2011; Marques et al., 2015; Silva et al., 2019a, 2019b), mostrando sua eficácia como agente biológico. Atualmente, o produto Cryptomip, registrado no Mapa, tem como ingrediente ativo o agente biológico *C. montrozieri*.

Estudos para o controle da praga exótica de citros denominada larva-minadora-da-folha-dos-citros *Phyllocnistis citrella* Stainton (Lepidoptera: Gracillariidae), identificada no país em 1996, também foram realizados por pesquisadores do LQCL. Esse inseto é vetor do cancro cítrico, doença bacteriana causada por *Xanthomonas citri* subsp. *citri*, presente no país desde 1957 e que afeta todas as variedades de citros (Levantamento..., 2020). De acordo com o Fundo de Defesa da Citricultura (Fundecitrus), em 2020 o cancro cítrico esteve presente em áreas citrícolas de São Paulo e do Triângulo Mineiro, em 24,59% dos talhões, 9% acima do registrado em 2019 (22,59%), com 17,26% das árvores com a doença (34 milhões de árvores) (Levantamento..., 2020). O parasitismo de *P. citrella* por *Galeopsomyia fausta* La Salle & Peña (Hymenoptera: Eulophidae) em condições brasileiras foi identificado em 1997 (Sá et al., 2000b; Garcia et al., 2001; Oliveira et al., 2001). Entretanto, por dificuldades de estabelecimento de métodos para a criação do parasitoide, em condição controlada de laboratório, não foi possível viabilizar sua multiplicação em número adequado às necessárias liberações inundativas, sendo seu uso como agente de controle inviabilizado (Sá, 2010a). A partir de parceria técnica estabelecida entre universidades, empresas e setor privado (ESALQ/USP, Fundecitrus e Gravena Manecol) e LQCL optou-se por realizar a introdução no país do parasitoide exótico *Ageniaspis citricola* Logvinovskaya (Hymenoptera: Encyrtidae), presente em áreas citrícolas da Flórida (Sá, 2010a). Assim, um pesquisador do LQCL realizou a busca exploratória desse organismo benéfico em pomares desse estado americano, subsidiado tecnicamente por uma pesquisadora americana da Universidade da Florida (Gainesville, EUA). Lá, foram realizadas coletas, triagens e identificações taxonômicas do material coletado, que viabilizou a importação de *A. citricola* desse local; demandada pelo mesmo pesquisador do LQCL (Processo 21052.009777/97-55; Permit 204a/97 (pror-

rogação em 05/05/1998)), que utilizou a estação de quarentena do LQCL a partir de julho/1998 (Tambasco et al., 2001b; Sá, 2010a). Esse parasitoide exótico foi estabelecido em criação laboratorial do LQCL e, após os procedimentos quarentenários, liberado pelo Mapa para os estudos pretendidos. A partir desses estudos, viabilizou-se a liberação do parasitoide *A. citricola* em pomares de São Paulo ainda em 2008, que resultou em parasitismo de 40% das pupas do inseto-praga e na mortalidade desejada (Chagas et al., 1999; Costa et al., 1999; Sá et al., 1999b, 2000c, 2001a, 2010a; Marsaro Júnior et al., 2006). Novos estudos prospectivos de inimigos naturais nativos para o controle de *P. citrella* foram também realizados em Roraima (Oliveira Júnior et al., 2001), onde identificaram-se quatro potenciais bioagentes ao controle; porém ainda sem indicativo de controle efetivo para fins de controle biológico inundativo (Marsaro Júnior et al., 2005; Sá et al., 2006). Desse modo, cinco liberações de *A. citricola* foram realizadas em pomares de limão Tahiti desse mesmo estado, a partir do envio desse parasitoide exótico mantido na criação laboratorial do LQCL, resultando em 50% de parasitismo de *P. citrella* e, portanto, em uma alternativa ao controle químico local; que já não fazia mais efeito no controle da praga (Marsaro Júnior et al., 2006). Vários outros estudos foram disponibilizados a partir desse organismo benéfico introduzido no país pelo LQCL (Sá et al., 2000d; Parra et al., 2002a, 2002b; Pimenta et al., 2011).

Outros estudos exploratórios sobre parasitoides de *P. citrella* foram realizados pelo LQCL em áreas do estado de São Paulo (município de Jaguariúna), antes e depois da introdução de *A. citricola* (Sá et al., 2000d), assim como estudos de avaliações pós-liberações do parasitoide em pomares desse mesmo estado (Sá et al., 2001a) e de flutuações populacionais da praga e do parasitoide (Sá et al., 2005). Estudos de simulação numérica para avaliação da distribuição espaço-temporal de *P. citrella* e seus inimigos naturais também foram viabilizados pela então Embrapa Informática Agropecuária e Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), contando com a colaboração técnica de pesquisador do LQCL e de pesquisador visitante (julho/1997 a junho/2000) do *Institut de Recherche pour Le Développement* (IRD), Montpellier (França) (Ternes et al., 2000). O LQCL também disponibilizou resultados para prover procedimentos para monitoramento de *P. citrella* e de *A. citricola* nos pomares paulistas (Sá, 2010b). Pimenta et al. (2011) reportaram uma parceria da Empresa Baiana de Desenvolvimento Agrícola (EBDA) com a Embrapa Mandioca e Fruticultura e FAPESB para determinar protocolo de criação massal de *A. citricola* para a Estação Experimental da EBDA (Alagoinhas, BA), indicando que o emprego desse organismo benéfico introduzido continua atual.

A mosca-negra-dos-citros *Aleurocanthus woglumi* Ashby (Hemiptera: Aleyrodidae), que era PQA quando ingressou no país em 2001 em área do estado do Pará, é importante praga de citros que também vem sendo estudada pelo LQCL/LEF e parceiros. Ao tornar-se PQP, rapidamente se dispersou para outras áreas e cultivos, conforme INs posteriores do Mapa, tornando-se praga de importância econômica. Infestações

ocorridas em pomares de citros e de mangueira do estado de São Paulo, em 2008, elevou o risco da praga atingir o cinturão citrícola do estado, maior produtor nacional. Estudos realizados pelo LQCL, em parceria com a Embrapa Recursos Genéticos e Universidade Estadual Paulista (Unesp) viabilizaram informações sobre a biologia, medidas de controle e a ocorrência do inseto em outros cultivos hospedeiros (Sá et al., 2008; Tagliari et al., 2008a, 2008b). Ainda hoje, para apoiar as estratégias de monitoramento, manejo e controle desse inseto polífago no país, atividades do LQCL no projeto DefesaInsetos também o estudam, com alguns resultados já disponibilizados ao DSV/SDA/Mapa em 2020. Entre eles, zoneamentos territoriais mensais e anuais de áreas brasileiras favoráveis ao maior desenvolvimento da mosca-negra-dos-citros foram apresentados, destacando as condições altamente favoráveis ao inseto nas regiões Norte e Nordeste (Mingoti et al., 2021b). Alternativas de controle (químico e biológico), considerando outros importantes cultivos hospedeiros de *A. woglumi* também foram propiciados em 2020 e continuam sendo atualizados (Ramos et al., 2021). Resultados do projeto sobre as moscas-das-frutas *B. carambolae* e *B. dorsalis*, que também atacam citros, vem igualmente sendo oportunizadas (Pessoa et al., 2019c; Jacomo et al., 2020).

Do mesmo modo, resultados do projeto CNPQ578283 (Embrapa SEG 03.09.059.00.00), citado em seção anterior, foram também disponibilizados para o cultivo de citros (Mazuchi et al., 2010; Pessoa et al., 2010a, 2010c; Carvalho et al., 2010; Giraldi et al., 2011a, 2011b; Sawazaki et al., 2010, 2011a, 2011b; Siqueira et al., 2011; Sá et al., 2014a). Entre eles, no sistema informatizado SysRiskQuarantine (Giraldi et al., 2011b) foi disponibilizado banco de dados (BD) com informações sobre as PQA e PQP com base na IN SDA/Mapa n. 41 de 01/julho/2008, de onde identificaram-se aquelas com potencial de provocar danos a citros. Também foram realizados levantamentos, em literatura técnico científica nacional e internacional, dessas pragas e de alguns de seus agentes de biocontrole (Mazuchi et al., 2010; Pessoa et al., 2010a, 2010c). No SysRiskQuarantine também foram disponibilizadas bases de dados com informações das principais pragas presentes e de municípios paulistas com cultivos de citros, incluindo seus principais fatores abióticos (Mazuchi et al., 2010; Pessoa et al., 2010a, 2010b; Giraldi et al., 2011a, 2011b).

Os dados já obtidos e organizados nos BDs de citros e de PQA do SysRiskQuarantine também subsidiaram as Ações de Vigilância Fitossanitária no estado de São Paulo, coordenadas pela Unidade Regional Técnica Agropecuária (UTRA) da Superintendência Federal de Agricultura em São Paulo (SFA-SP) do Mapa (Mapa/UTRA-Campinas). Nesse contexto, contribuíram para as ações técnicas do Programa de Vigilância Fitossanitária SFA-SP (VIGIFITO) - subgrupo “Citros”, realizadas no período de 2011 a 2013. O subgrupo “Citros” do Mapa/UTRA-Campinas contou com a participação técnica de três pesquisadores do LQCL, além daquelas também oferecidas à esse grupo pelos pesquisadores de destaque na área de citricultura, pertencen-

tes à Agência Paulista de Tecnologias e Agricultura - APTA (Instituto Biológico, UPD Sorocaba, Centro de Citricultura Sylvio Moreira) e Fundecitrus, acrescidas dos fitopatologistas da SFA/Mapa-UTRA e do apoio das chefias do Mapa (DQV/DSA/SDA, UTRA/Campinas/SFA-SP, DDA/SFA-SP e do SSV/DDA/SFA-SP). O subgrupo elencou as principais pragas exóticas ausentes de importância imediata para o cultivo de citros e contribuiu com informações para a elaboração de planos de emergência dessas pragas (PQA e outras apresentadas como sugestão para inclusão na lista de PQA (à época, A1)), oferecidos ao Mapa. Dados disponíveis no SysRiskQuarantine para citros foram utilizados nesse trabalho, acrescidas de outras informações detalhadas levantadas para as pragas desse cultivo. Nesse contexto, os pesquisadores do LQCL também realizaram busca prospectiva para atualizar e identificar informações para todos os inseto-pragas com potencial de ataque ao cultivo, sugeridos pelo subgrupo. Aspectos importantes para a apresentação do conteúdo dos planos de emergência para a área de quarentena vegetal foram apresentados pelo Mapa/UTRA-Campinas e considerados no trabalho. Uma nova base de dados foi gerada considerando os dados obtidos pelo subgrupo Citros, apresentando informações biológicas detalhadas para 33 pragas priorizadas, entre PQA e sugestões de espécies para inclusão na lista de PQA. Assim, o subgrupo contribuiu com a identificação de sintomas, bem como de distribuição geográfica, partes dos cultivos afetados e fatores de dispersão dessas pragas. Também viabilizou procedimentos para a detecção das pragas, links de sites com imagens de diferentes fases de desenvolvimento, protocolos para a contenção de áreas, uso de materiais e formas de coleta para envio à laboratórios credenciados do Mapa para procederem confirmação das espécies, quando necessário, entre outras informações. O resultado desse trabalho viabilizou informação em formato de interesse do Mapa à elaboração de planos de emergência e contenção. A base de dados gerada pelo Subgrupo “Citros” foi incorporada a um novo sistema web (“QUARVEG”); desenvolvido por pesquisadora do LQCL e pela coordenadora (fitopatologista) do subgrupo citros (Mapa-UTRA/Campinas), para viabilizar o acesso *online* de todo o conteúdo via internet. O QUARVEG permitia agilizar a recuperação de informações das pragas priorizadas pelo subgrupo para o cultivo de citros em São Paulo, sendo uma forma ágil de capacitar técnicos, fiscais e pesquisadores para a identificação dessas pragas exóticas com potencial de entrada iminente no país, além de permitir uniformizar procedimentos a serem tomados em caso de suspeita de registro de presença. O sistema QUARVEG foi apresentado e disponibilizado ao DSV/SDA/Mapa, em 12/dez/2012, pela coordenadora do subgrupo citros do Mapa/UTRA-Campinas.

Vários insetos-praga identificados pelo subgrupo Citros foram considerados em atividades realizadas, posteriormente, com a participação técnica de pesquisadores do LQCL. Entre elas, na priorização de 20 pragas quarentenárias, realizadas pelo DSV/SDA/Mapa e Embrapa (Laranjeira et al., 2016; Fidelis et al., 2018b). Em 2016 e

2017, a PQA *Prodioplosis longifila* (Gagné) (Diptera: Cecidomyiidae), praga polífaga que causa sérios danos no exterior aos cultivos de abacate, alcachofra, algodão, batata, citros (laranja, limão, tangerina), feijão e tomate, foi estudada em ações de pesquisa lideradas pela Embrapa Territorial (Agenda INTEGRO) e realizadas em parceria com pesquisadores do LQCL, por ter sido priorizada pelo subgrupo Citros. Como resultado, informações biológicas e zoneamentos territoriais nacionais indicando áreas brasileiras com maior necessidade de vigilância preventiva, localizadas em determinados municípios dos estados do Acre, Amazonas e Rondônia, bem como aprofundamentos posteriores dessas áreas, foram realizados (Holler et al., 2016a, 2016b; Mingoti et al., 2017), contribuindo para as ações de vigilância fitossanitária do país.

Ainda com atenção ao cultivo de citros, pesquisadores do LQCL também atuaram em estudos do inseto-vetor daquela que é considerada a pior doença da citricultura, o *Huanglongbing* (HLB) ou *greening*. Esta é causada pela bactéria *Candidatus Liberobacter* e continua acometendo áreas do cinturão citrícola de São Paulo e do Triângulo/Sudoeste de Minas Gerais, onde somente em 2020 os sintomas da doença foram registrados, em média, em 20,87% das laranjeiras (41,3 milhões de árvores), representando um aumento de 9,7% em relação ao nível registrado no ano anterior (19,02%) (Levantamento..., 2020). O Fundecitrus também relatou que “as regiões com maiores incidências da doença em 2020 são também aquelas com maiores populações de psilídeos observadas pelo sistema de Alerta Fitossanitário do Fundecitrus nos anos anteriores (2018 e 2019)” (Levantamento..., 2020). Entretanto, o cenário só não é pior, pelo empenho de várias instituições de pesquisas que envidam esforços conjuntos para mais bem conhecer e prover o controle da doença e de seu inseto-vetor *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae).

Pesquisadores do LQCL participaram da formulação e como membros do comitê gestor do Arranjo HLB dos citros da Embrapa, liderado pela Embrapa Mandioca e Fruticultura, contribuindo para a priorização da carteira de projetos temática desse arranjo. No âmbito dos projetos da Unidade desse arranjo, o LQCL também colaborou disponibilizando estudos desse inseto-vetor e alternativas de controle biológico no projeto Controle biológico e técnicas alternativas para o controle do psilídeo-dos-citros - HLB-Biocontrol (Embrapa SEG 02.13.03.004.00.00), que contou com a participação de pesquisadores de diversas unidades da Embrapa (entre elas, Embrapa Clima Temperado, Semiárido, Mandioca e Fruticultura, Amazônia Oriental, Tabuleiros Costeiros, e Recursos Genéticos) como também universidades parceiras (ESALQ/USP e Universidade de Feira de Santana). Os estudos realizados pelo LQCL e LEF nesse projeto focaram o controle biológico e alternativo do inseto-vetor, *D. citri*. Com relação ao controle biológico, o projeto contribuiu com estudos voltados à avaliação de parasitoides exóticos como alternativas ao controle, à melhoria do uso de recursos nas criações laboratoriais e aos estudos de cenários prospectivos (simulações) para avaliar a dinâmica populacio-

nal de diferentes fases de desenvolvimento de *D. citri*, do ecoparasitoide *Tamarixia radiata* (Waterston) (Hymenoptera: Eulophidae) e do endoparasitoide *Diaphorencyrtus aligarhensis* (Shafee, Alam e Argarwal) (Hymenoptera: Encyrtidae). Embora inicialmente tenham sido realizados estudos para avaliar a necessidade da importação de *T. radiata*, parasitoide considerado ausente do país, este foi posteriormente identificado como presente em Piracicaba/SP, em trabalhos de campo da ESALQ/USP; motivo pelo qual a importação prevista foi cancelada. A ESALQ/USP estabeleceu a criação e realizou vários estudos avaliando controle de *T. radiata* sobre *D. citri* em conjunto com o Fundecitrus, como também avaliou liberações em campo no país. Baixos índices de parasitismo foram observados em áreas do Nordeste do Brasil, onde importantes polos citrícolas também estão presentes, demandando ao projeto HLB-Biocontrol avaliar, em conjunto com seus parceiros, a necessidade de manter e realizar a importação de *D. aligarhensis*, proveniente dos Estados Unidos, demandada pelo LQCL em 2015 (Processo 21052.009360/2015-26) (Sá et al., 2016b). Assim, um pesquisador do LQCL foi para esse país para melhor conhecer o parasitoide, sua criação e interações desse organismo benéfico com *T. radiata*, principalmente em liberações de campo já em uso naquele país, dado ser alvo de pesquisas do LQCL pós quarentena do material (Sá et al., 2016b). A importação do material foi mantida, tendo sua primeira remessa sido recebida no LQCL em setembro/2015, porém não houve emergência significativa do parasitoide (Sá et al., 2016b). A segunda remessa, recebida em junho/2016, permitiu realizar bioensaios com esse parasitoide exótico em *D. citri* em mudas de *M. paniculata* dispostos em gaiolas entomológicas, em condição controlada de laboratório de quarentena até 26/08/2016. Porém, por questões legais posteriores (Instrução Normativa Ibama/MMA n. 5 de 26/08/2016), não foi possível dar andamento ao plano inicialmente pretendido pelo projeto HLB-Biocontrol, tendo sido a criação do parasitoide incinerada.

Estudos visando a melhoria da qualidade da criação laboratorial de *D. citri*, considerando dois hospedeiros-plantas diferenciados (murta-de-cheiro, *Murraya paniculata* (L.) Jack (Sapindales: Rutaceae), e limão-cravo, *Citrus limonia* Osbeck (Sapindales: Rutaceae)), com foco em estimar as demandas desses hospedeiros (praga e plantas) para as criações dos parasitoides alvos do projeto, foram realizados em salas de criação do quarentenário e do LEF (Neves et al., 2015; Sá; Souza, 2015; Augusto et al., 2016; Calderari et al., 2016; Momesso et al., 2016; França et al., 2018; Pessoa et al., 2015a, 2020b). Parte desses trabalhos contou com parcerias das Embrapa Clima Temperado, bem como apoio das Embrapa Mandioca e Fruticultura (estação no Fundecitrus de Araraquara, SP), Fundecitrus (Araraquara, SP) e do Centro de Citricultura Sylvio Moreira da APTA-IAC (Cordeirópolis, SP).

Ainda com relação aos estudos voltados para *D. citri*, importantes aspectos na coloração abdominal de machos e de fêmeas de *D. citri*, variando conforme a planta hospedeira (*C. limonia* ou *M. paniculata*) utilizada na criação laboratorial desses in-

setos, foram observados e disponibilizados por pesquisadores do LQCL no mesmo projeto (Luchini et al., 2017b; Pessoa et al., 2020b). Esses resultados indicaram a predominância e exclusividade de colorações abdominais azul e creme azulada para fêmeas em *C. limonia* (Pessoa et al., 2020b), com potencial para auxiliar nas estratégias de manejo desse inseto-vetor do HLB em campo, quando direcionadas à identificação de fêmeas da espécie aptas a realizarem posturas.

Na busca por novas alternativas de controle, o efeito de diferentes inibidores de proteases sobre o ciclo de vida foi avaliado e realizada a caracterização bioquímico-cinética de cisteíno protease de *D. citri* (Souza et al., 2016; Marinho-Prado et al., 2016; Sanchez, 2018). Todos os inibidores testados aumentaram a mortalidade de ninfas, com destaque para o inibidor E64, que apresentou também efeitos adversos na emergência, oviposição e viabilidade dos ovos (Sanchez, 2018). A caracterização de cisteíno proteases de *D. citri* e os resultados das avaliações sugeriram que os psíldeos utilizam cisteíno proteases para a digestão de proteínas (Sanchez, 2018). Outro estudo verificou que *D. citri* submetido a inibidores de serino-proteases apresentaram maior porcentual de detecção do endossimbionte primário *Candidatus Carsonella ruddii*, quando comparados aos insetos submetidos ao inibidor de cisteíno-proteases (Dorneles Junior et al., 2017).

Acrescenta-se também a participação de pesquisadores do LQCL, de 2013 a 2018, no Arranjo HLB dos Citros Soluções inovadoras e integradas para a superação da doença *Huanglongbing* (HLB, ex *greening*) dos citros, liderado pela Embrapa Mandioca e Fruticultura, que apontou as seis linhas temáticas estratégicas para realização de pesquisas da Embrapa nesse tema (Girardi et al., 2017). Vários outros estudos do LQCL e parceiros foram realizados com foco em citros e outras frutíferas e podem ser resgatados na Base de Dados da Pesquisa Agropecuária (BDPA-Embrapa) ou na Infoteca-e da Embrapa.

Para o cultivo de banana, além das ações já relatadas em projetos conduzidos no VSF até 2001, citam-se outras realizadas em serviços quarentenários e em pesquisas. Como um exemplo, a EQ do LQCL participou na introdução de nematoides entomopatogênicos *Steinernema carpocapsae* (Weiser) (Nematoda: Steinernematidae) (strains “MF” e “ALL”), para pesquisas para o controle da broca-da-bananeira (também conhecida como moleque da bananeira) *Cosmopolites sordidus* (Coleoptera: Curculionidae), demandada em 1991 pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) de Itajaí, SC (Tambasco et al., 2001b). Ainda para este cultivo, citam-se as atividades de pesquisa recente da Unidade, com foco na identificação de fatores de predisposição à fusariose da bananeira e de alternativas para seu manejo; em andamento no Projeto Embrapa SEG 10.20.00.058.00.00 (processo Fapesp 2018/22357-1). Um de seus objetivos é a prospecção de fungos entomopatogênicos em populações de *C. sordidus* em plantios de banana no estado de São Paulo, tendo já sido isoladas dez cepas de fungos do gênero *Beauveria*, que estão sendo

avaliadas quanto à patogenicidade e virulência sobre o inseto-praga em condição controlada de laboratório.

Várias outras contribuições do LQCL para o controle biológico clássico de pragas exóticas de fruteiras do país estão disponíveis em literatura (Sá et al., 2000d, 2011, 2016a; Parra et al., 2002a, 2002b; Sá; Oliveira, 2005; Sá; Lucchini, 2009).

## ESTRATÉGIAS PARA O CONTROLE DE ÁCAROS DE IMPORTÂNCIA ECONÔMICA PARA A AGRICULTURA

A Embrapa Meio Ambiente também disponibilizou conhecimento e colaborou com várias instituições nacionais e internacionais na busca de estratégias de controle de ácaros de importância agrícola. Realizou atividades tanto em projetos de pesquisa como em serviços técnicos prestados pela EQ do LQCL nos processos oficiais de introdução e exportação de organismos benéficos visando ao controle de ácaros fitófagos (Moraes et al., 1994; Sá; Moraes, 2001; Sá et al., 2016a; Sá, 2017).

Dentre as espécies de organismos benéficos introduzidos no país ou exportados, utilizando a EQ do LQCL, registraram-se várias espécies de ácaros predadores. Neles também se encontram outros organismos benéficos, tais como fungos patogênicos, igualmente estudados para o controle de ácaros fitófagos. Parte dessa contribuição de pesquisa e de serviços quarentenários será destacada a seguir, estando outras disponíveis em literatura técnica.

No interesse da pesquisa de ácaros de importância econômica, estudos foram realizados visando ao controle do ácaro verde da mandioca *Mononychellus tanajoa* (Bondar) (Tetranychidae), praga que no Brasil causa danos a esta cultura principalmente na Região Nordeste e que, ainda hoje, provoca perdas em cultivos de mandioca do Brasil e da África (Boaventura et al., 2012). A contribuição de pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente em ações visando ao CBC do ácaro verde iniciou-se em 1990, em projeto financiado pelo Convênio celebrado entre a Embrapa e o *International Institute of Tropical Agriculture* (IITA), do qual participou também a Embrapa Trópico-Semiárido (atual Embrapa Semiárido). Neste, ações extensivas foram realizadas para se determinar predadores promissores para coleta no Brasil e envio à África, com o objetivo de controlar a praga. Assim, métodos de criação massal de ácaros predadores do ácaro verde foram adaptados de outros já disponíveis ou desenvolvidos para viabilizar criações massais desses bioagentes para liberações inoculativas ou inundativas (Alencar et al., 1990; Moraes et al., 1993). Por esta colaboração, dezenas de espécies de ácaros predadores foram identificados no Brasil, como potencialmente úteis para o controle biológico dessa praga. Destas, três fitoseídeos se estabeleceram em diferentes países africanos (*Neoseiulus idaeus* Denmark & Muma, *Amblydromalus maihoti* (Moraes) e *Typhlodromalus aripo* De Leon), contribuindo significativamente com o controle desta praga no continente africano (Moraes; Flechtmann, 2008).

Com foco na pesquisa sobre o controle biológico clássico de populações de ácaros-pragas para o Brasil, a primeira introdução oficial de ácaros predadores no país utilizando o LQCL se deu em 1992, com a importação da espécie *Phytoseiulus persimilis* (Athias-Henriot) (Phytoseiidae) a partir de Amsterdam, Holanda, por demanda da EPAGRI de São Joaquim, SC. Esta espécie foi introduzida para avaliar seu efeito no controle do ácaro-rajado *Tetranychus urticae* (Kock) (Tetranychidae). No ano seguinte, a EQ do LQCL também atuou no processo de importação do fitoseídeo *Typhlodromus pyri* (Scheuten) de Nyon, Suíça, demandado por empresa privada do Rio Grande do Sul para estudos de controle biológico do ácaro-vermelho-europeu *Panonychus ulmi* (Koch) (Tetranychidae). Essa introdução possibilitou também a criação do fitoseídeo na Embrapa Uva e Vinho, para liberações em pomares de maçã no estado.

Estudos foram também realizados em condições climáticas de Jaguariúna, SP, por pesquisadores dos LEF e LQCL da Embrapa Meio Ambiente, para avaliar o potencial de uso de espécies de fitoseídeos já encontradas no Brasil à época, a saber *Amblyseius idaeus* (Denmark & Muma) (ou *Neoseiulus idaeus* (Denmark & Muma)) e *Phytoseiulus macropilis* (Banks), como opção ao uso de acaricidas para o controle do ácaro rajado em cultivos de morango e pepino (Watanabe et al., 1994). Esse trabalho indicou o potencial de controle da praga com liberações de *A. idaeus* em pepino e de *A. idaeus* ou de *P. macropilis* em morango (Watanabe et al., 1994). No mesmo período, ensaios sobre o impacto de agrotóxicos nesses potenciais agentes de controle biológico também foram realizados, indicando a não recomendação de uso de piretróides no manejo do ácaro rajado quando sob controle biológico inundativo com aqueles dois predadores (Watanabe et al., 1992). As informações oportunizadas para *P. macropilis* foram parte da base de conhecimento e motivadora para a continuidade dos estudos envolvendo esse agente de controle biológico. Atualmente, existem produtos comerciais registrados no Mapa fazendo uso de *P. macropilis* e outros ácaros predadores como ingredientes ativos de produtos biológicos para o controle do ácaro rajado.

Ainda para o controle do ácaro verde da mandioca, o quarentenário continuou contribuindo com a Embrapa Mandioca e Fruticultura, realizando os procedimentos técnicos necessários para atender à quarentena de introduções de mais duas espécies de ácaros, ambas procedentes também do Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Uma dessas espécies, *Amblyseius californicus* (McGregor) (= *Neoseiulus californicus*) foi mantida em quarentena em 1995 (Tambasco et al., 2001b), e atualmente, vários produtos formulados registrados no Mapa contém esse ácaro (produto microbiológico) como seu ingrediente ativo. A outra espécie, o fitoseídeo *Typhlodromalus tenuiscutus* (McMurtry & Moraes) foi mantido em quarentena em 1996 (Tambasco et al., 2001b). Nesse mesmo ano, estudos conduzidos pela ESALQ/USP e pelo LQCL foram iniciados (setembro) no âmbito das atividades do Programa Cooperativo celebrado entre o *International Institute of Tropical Agriculture* (IITA) e Embrapa,

que perdurou até maio/1997, disponibilizando mais resultados para contribuir com o controle biológico do ácaro verde da mandioca (Noronha et al., 1995; Rodrigues et al., 1996; Tambasco et al., 2001b). Entre eles, estratégias de controle foram identificadas, a partir de análises de dados coletados pela Embrapa Semiárido, em Petrolina/PE (Tambasco et al., 2001b).

Nesse contexto, o fungo *Neozygites floridana* (Weiser & Muma Remaudière & Keller) (Entomophthorales: Neozygitaceae) também foi introduzido no Brasil para estudos comparativos, a partir de material proveniente do CIAT (Cali, Colômbia) e IITA (Cotonou, República de Benin), com quarentena realizada no LQCL em 1997 e liberação, posterior, à Embrapa Mandioca e Fruticultura (demandante) (Tambasco et al., 2001b). Estudos antecedentes à essa introdução foram realizados pelo LQCL para avaliar a suscetibilidade de abelhas à *N. floridana* (Hountondji et al., 1995). Em julho/1997, a Embrapa Mandioca e Fruticultura enviou amostras deste mesmo fungo ao exterior, por processo de exportação oficial do Mapa atendendo à demanda do *Swiss Federal Research Station for Agroecology and Agriculture* (Zurique, Suíça), utilizando a EQ do LQCL (Tambasco et al., 2001b). No mesmo ano, outras duas espécies de fitoseídeos, demandadas pelo CIAT para pesquisas, foram enviadas pelo LQCL em outro processo de exportação (Tambasco et al., 2001b). Ainda em 1997, uma nova importação de *N. floridana* do strain ARSEF 5376 do USA-ARS *Plant Protection Research Unit* (Ithaca, NY-EUA) foi feita, para realização de estudos no laboratório da Embrapa Meio Ambiente (Tambasco et al., 2001b). A partir desse material foram viabilizados experimentos que avaliaram a biologia e a eficácia de *N. floridana* no controle do ácaro verde (Gondim Júnior et al., 1996; Odour et al., 1996a, 1996b; Tambasco et al., 2001b). Ainda no âmbito do Programa Cooperativo IITA/Embrapa, novos estudos sobre o controle biológico do ácaro verde foram conduzidos entre 1996 e 1998. Nele, foi introduzido em 1997, por demanda da Embrapa Mandioca e Fruticultura, as espécies *Typhlodromus* spp. e *Euseius* spp. (Phytoseiidae) provenientes do CIAT (Tambasco et al., 2001b). Em 1998, dois processos de exportação de *N. floridana* foram realizados, um atendendo ao Laboratório de Quarentena da Universidade de Amsterdam (Holanda) e outro atendendo à Cornell University (Ithaca, NY-EUA), com materiais enviados respectivamente pela Embrapa Meio Ambiente e Embrapa Mandioca e Fruticultura.

Estudos sobre o ácaro fitoseídeo *Amblyseius manihot* Moraes n. sp. (= *Amblydromalus manihot*, Phytoseiidae) também foram realizados pelo LQCL, Embrapa Mandioca e Fruticultura e Escola Superior de Agronomia de Lavras (ESAL), indicando esse organismo como predador comumente associado ao ácaro verde da mandioca (Noronha et al., 1995). Avaliações de preferências às variedades da cultura foram igualmente realizadas pelos mesmos autores.

De julho/1997 a junho/2000, o LQCL contou com a visita técnica de um pesquisador do *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD) (Montpellier, França),

para a condução de trabalhos visando a *caracterização das interações predador-presa e análise do impacto da introdução de um novo agente de controle biológico em agroecossistema usando modelagem*. Neste contexto, a dinâmica populacional de *Typhlodromalus manihoti* (Moraes) (= *Amblydromalus manihot*, Phytoseiidae) em mandioca foi avaliada por modelagem matemática (Noronha et al., 1998), tendo também sido avaliada a estrutura etária e flutuação populacional de *T. manihot* sobre mandioca (Bonato et al., 1999a, 2000a). De igual modo, a aptidão de três espécies vegetais ao crescimento e desenvolvimento do ácaro-vermelho-do-amendoim *Tetranychus ogmophallos* Ferreira & Flechtmann (Tetranychidae), importante praga desta cultura, foi investigada (Bonato et al., 1999b, 2000b). Na mesma época, um estudo conjunto foi desenvolvido pela então Embrapa Informática Agropecuária e UNICAMP, com a participação de pesquisadores do LQCL e do IRD, voltado para a avaliação de dois inimigos naturais da larva-minadora-dos-citros em condições do estado de São Paulo (Ternes et al., 2000).

Em 2004, a EQ do LQCL atuou no processo de exportação do ácaro predador *Proctolaelaps bickleyi* (Bram) (Ascidae) para o Sri Lanka, para estudos daquele país sobre o controle biológico do ácaro da necrose do coqueiro *Aceria guerreroni* Keifer (Eriophyidae) (Tambasco et al., 2001b). No ano seguinte, o fitoseídeo *Phytoseiulus longipes* Evans foi enviado para o Quênia, África, em processo de exportação quarentenado no LQCL, para apoiar estratégias de controle biológico do ácaro-vermelho-do-tomateiro *Tetranychus evansi* Baker & Pritchard (Tetranychidae) naquele país (Tambasco et al., 2001b). Já em 2006, três espécies de ácaros predadores, a saber, *P. bickleyi* e os fitoseídeos *Neoseiulus paspalivorus* DeLeon e *Neoseiulus baraki* (Athias-Henriot) foram exportadas oficialmente, utilizando os trabalhos técnicos do quarentenário, para a República do Benin, apoiando estudos de controle do ácaro-da-necrose-do-coqueiro *Aceria guerreronis* Keifer, no âmbito das ações do Programa de Cooperação entre a Embrapa e o IITA (Tambasco et al., 2001b).

Novos trabalhos, em anos mais recentes, tiveram foco na prospecção de inimigos naturais para o ácaro-vermelho-das-palmeiras *Raoiella indica* Hirst (Tenuipalpidae) realizado na Ilha de La Réunion de Saint Pierre, território francês no Oceano Índico (Moraes et al., 2012). Trata-se de importante praga de palmeiras (babaçu, buriti, carnaúba, coqueiro, coqueiro piaçava, dendezeiro e pupunha), à época do estudo ainda PQA no Brasil, mas hoje amplamente distribuída no país. Para este trabalho, o LQCL atuou no processo de importação do fitoseídeo *Amblyseius largoensis* (Muma), em 2010 e 2011, demandada pela Embrapa Roraima, para a realização de estudos para viabilizar alternativas de redução de potenciais prejuízos, em vista da ocorrência da praga nos cultivos já citados.

O LQCL também participou, em 2012, como EQ no processo de importação de vários ácaros predadores (Processo 21052.001377/2012-92), demandados pela ESALQ/USP. Assim, como alguns exemplos de espécies recebidas neste processo, citam-se as

procedentes de países da América do Sul *Euseius emanus* (El-Banhawy) (do Peru), *E. flechtmanni* (Denmark & Muma) (Phytoseiidae) (do Paraguai) e *E. fructicolus* (Gonzalez & Schuster) (do Chile); recebidas e liberadas em 2013. Essas importações visaram ao controle biológico do microácaro-do-bronzeamento-do-tomateiro *Aculops lycopersici* (Masse) (Eriophyidae). Ainda em 2013, foi recebida no LQCL, e posteriormente liberada pelo Mapa, a importação do fitoseídeo *Amblyseius swirskii* Athias-Henriot, da República do Benin, demandada pela ESALQ/USP (Processo 21052.010811/2012-25). A finalidade dessa introdução foi a comparação da eficiência deste ácaro com aquela de outras espécies já presentes no Brasil, como agente de controle da mosca-branca *Bemisia tabaci* (Genn.) (Hemiptera: Alyrodidae), praga de diversos cultivos. No mesmo ano, houve o recebimento dos fitoseídeos *Amblyseius largoensis* (Muma), *A. cinctus* (Corpuz-Raros & Rimando) e *A. phillipsi* (McMurtry & Schicha), procedentes da Tailândia, demandados pela ESALQ/USP (Processo 21052.003412/2013-99), liberados pelo Mapa no mesmo ano, para a realização de estudos de comparação do desempenho destes com os de espécies nativas no controle do ácaro-vermelho-das-palmeiras.

Citam-se também estudos realizados para avaliar o efeito do sistema de produção de citros na densidade populacional de ácaros (Oliveira et al., 2011).

Os exemplos dos estudos e serviços quarentenários aqui citados não esgotaram aqueles efetivamente realizados no tema desta seção. Vários outros tratando de ácaros de diversas culturas, com a colaboração do LQCL, se encontram na literatura técnica disponível na Base de Dados da Pesquisa Agropecuária (BDPA) da Embrapa, entre outros repositórios e bancos de teses de universidades brasileiras.

## CONHECIMENTO BIOLÓGICO E MÉTODOS DE CRIAÇÃO SOBRE INSETOS-PRAGAS EXÓTICAS DE EUCALIPTO, E SEUS POTENCIAIS AGENTES DE CONTROLE BIOLÓGICO, DISPONIBILIZADOS PARA PESQUISA E SETOR FLORESTAL

Outro setor produtivo que contou com vários resultados de estudos disponibilizados foi o setor florestal, onde o foco principal dos trabalhos do LQCL e LEF ateu-se às pragas da floresta plantada de eucalipto, embora tenha contribuído também em atividades para o cultivo de pinus

Nativo da Austrália, o eucalipto *Eucalyptus* spp. se adaptou bem ao Brasil, onde esse produto vegetal vem sendo utilizado em diferentes segmentos dos mercados nacional e internacional. De acordo com o Sistema Nacional de Informações Florestais (SNIF), do Serviço Florestal Brasileiro (SFB), a Indústria Brasileira de Árvores (Ibá) representa a cadeia produtiva de árvores plantadas, reunindo empresas que participam das maiores associações brasileiras do setor (Associação Brasileira da Indústria

de Painéis de Madeira (Abipa), Associação Brasileira da Indústria de Piso Laminado de Alta Resistência (Abiplar), Associação Brasileira dos Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF) e Associação Brasileira de Celulose e Papel (Bracelpa)) (Serviço Florestal Brasileiro, 2021). Frente aos múltiplos usos desse produto vegetal (carvão vegetal, papel, celulose, laminados, óleos essenciais, entre outros bioprodutos) e aos seus benefícios para o meio ambiente (fonte de energia renovável, reciclagem, sequestro de carbono atmosférico, entre outros), em 2019 a área plantada de eucalipto no Brasil foi de 6,97 milhões de hectares, distribuídos em várias regiões do país, predominando nos estados de Minas Gerais (1,92 milhões de hectares), São Paulo (1,22 milhões de hectares), Mato Grosso do Sul (1,12 milhões de hectares), Bahia (0,59 milhões de hectares) e Rio Grande do Sul (0,46 milhões de hectares) (Indústria Brasileira de Árvores, 2020). A alta produtividade dos plantios de eucalipto nacionais é destacada internacionalmente, tendo alcançado, no mesmo ano, a produtividade média de 35,3m<sup>3</sup>/ha (Indústria Brasileira de Árvores, 2020).

Entre os fatores que contribuíram para atingir essa produtividade citam-se as alternativas de controle biológico clássico disponibilizadas para o controle de pragas exóticas identificadas no país nos últimos 20 anos. Wilcken et al. (2018) reportaram perdas de produção de madeira na ordem de US\$ 600 milhões, causadas pelas presenças de pragas exóticas ingressas no país, a saber dos psilídeo-de-concha, percevejo-bronzeado, vespa-da-galha e besouro-do-eucalipto *Gonipterus platensis* (Coleoptera: Curculionidae). Ainda segundo Wilcken et al. (2017), em 2012, somente o percevejo-bronzeado infestou 245 mil ha de eucaliptos, reduzindo de 10-15% a produção de madeira e gerando perdas de US\$ 330 milhões até 2015. Desse modo, as alternativas de controle biológico clássico estudadas e disponibilizadas vem se mostrando eficazes para plantações florestais em larga escala e possibilitaram a redução do uso de pulverizações de agrotóxicos, contribuindo também para a redução de custos de controle e para permanência em sistemas de certificações florestais internacionais (Wilcken et al., 2018, 2019).

Neste contexto, além de participar dos serviços quarentenários de introduções de organismos benéficos para o controle biológico clássico de pragas exóticas do cultivo de eucalipto, desde 2003 pesquisadores do LQCL realizam estudos sobre esses insetos-pragas exóticos e seus respectivos parasitoides exóticos, para apoiar o manejo integrado em hortos florestais nacionais. A maior parte desses estudos abordam pragas de origem australiana, a saber, o psilídeo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* Moore (Hemiptera: Aphalaridae) identificado no país em 2003 (Wilcken et al., 2003; Sá; Wilcken, 2004), a vespa-da-galha *Lectocybe invasa* Fisher e La Salle (Hymenoptera: Eulophidae) em 2007 (Wilcken; Berti Filho, 2008) e o percevejo-bronzeado *Thaumastocoris peregrinus* Carpintero & Dellapé (Hemiptera: Thaumastocoridae) em 2008 (Wilcken et al., 2010, 2014).

As pesquisas do LQCL sobre as pragas supracitadas e seus respectivos parasitoides exóticos, bem como os serviços quarentenários realizados em seus processos de introduções no país, foram conduzidos principalmente em atividades realizadas junto ao Programa Cooperativo sobre Proteção Florestal (PROTEF) do Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF), oficializada a partir de fevereiro/2005 em Acordo de Cooperação Técnica celebrado entre a Embrapa Meio Ambiente e o PROTEF/IPEF, com contratos que perduraram até agosto/2020. Desses acordos de cooperação fizeram parte Universidades (ESALQ/USP, UFV e FCA/Unesp campus Botucatu), unidades da Embrapa (Meio Ambiente e Florestas) e as principais empresas do ramo florestal do país. As ações de pesquisa do LQCL foram principalmente direcionadas aos estudos de monitoramentos das pragas e parasitoides, realizados em hortos-florestais da Celulose Nipo-Brasileira Ltda (CENIBRA), em Minas Gerais, e da International Paper do Brasil Ltda, em São Paulo. Assim, a partir de 2005 o projeto Monitoramento de praga exótica psilídeo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Psyllidae) e de seu parasitoide exótico *Psyllaephagus bliteus* (Hymenoptera: Encyrtidae) no controle biológico desta praga em florestas de eucalipto nos Estados de São Paulo e Minas Gerais (Embrapa SEG 03.05.00.126.00.00), foi apropriado na Embrapa, oficializando em seu conteúdo as ações realizadas de 2003 a 2005. Esse projeto foi renovado consecutivamente até 2013 (Sá et al., 2014c), conforme os planos de atividades contratadas. Posteriormente, as atividades do LQCL passaram a fazer parte do projeto Processos quarentenários para introdução, criação e estabelecimento de bioagentes exóticos de controle em laboratório e de monitoramento em campo no âmbito do Projeto Cooperativo de Monitoramento de Manejo de Pragas exóticas em florestas de eucalipto do PROTEF/IPEF (QUAREUCA) (Embrapa SEG n. 03.13.00.014.00.00, convertido para 33.13.00.014.00.00), realizado de 01/03/2013 a 30/09/2019, para abordar as pesquisas com as demais pragas-alvo; prorrogado até 2020, em função de vigência do acordo com o PROTEF/Ipef.

No âmbito dos serviços técnicos quarentenários do LQCL nesses projetos citam-se o acompanhamento das introduções de parasitoides exóticos *Psyllaephagus bliteus* Riek (Hymenoptera: Encyrtidae), *Cleruchoides noackae* Lin & Huber (Hymenoptera: Mymaridae) e *Seletrichodes nesi* Kelly & La Salle (Hymenoptera: Eulophidae). O parasitoide *P. bliteus* foi importado do México, demandado pela FCA/Unesp Botucatu, para o controle do psilídeo-de-concha (Processo 21052.018745/2003-41; prorrogada em 29/04/2005). Contudo, a importação pretendida não foi realizada de imediato, pela presença desse himenoptero junto às ninfas da praga observadas em monitoramentos realizados em 2003 em áreas paulistas, incluindo naquelas avaliadas pelo LQCL no município de Jaguariúna (Sá et al., 2004c). Porém, após tentativas de estabelecimento da criação do parasitoide com o material coletado de campo, constatou-se a necessidade da importação, cujas remessas foram recebidas no LQCL até 2006 e liberadas pelo Mapa

para a FCA (Sá et al., 2018a). A importação do parasitoide *C. noackae*, da Austrália, foi demandada em 2010 pela FCA, visando ao controle biológico do percevejo-bronzeado (Processo 21052.002055/2010-07), tendo as remessas desse parasitoide sido avaliadas pela quarentena do LQCL, e posteriormente liberadas pelo Mapa ao demandante, até 2012. Visando ao controle da vespa-da-galha, o mesmo demandante solicitou a importação do parasitoide *S. nesei* da África do Sul em 2015 (Processo 21052.004117/2013-50; prorrogada em 16/janeiro/2015). O parasitoide, recebido no mesmo ano na quarentena do LQCL, foi liberado pelo Mapa em 2015 para o demandante (FCA).

As importações dessas espécies exóticas subsidiaram atividades previstas pelo PROTEF para a determinação de método de criação laboratorial adequado à multiplicação e manutenção da criação do parasitoide em laboratório, bem como estudos de monitoramentos acompanhados nesse programa em hortos florestais e que resultaram na observação do controle biológico clássico efetivo do psílideo-de-concha, percevejo-bronzeado e vespa-da-galha (Sá et al., 2018b; Wilcken et al., 2018, 2019).

Entre os resultados de pesquisa e desenvolvimento obtidos pelo LQCL para essas pragas e parasitoides citam-se os de caráter biológico (Sá et al., 2009; Pessoa et al., 2010d), de fundo metodológico de criações em condição controlada de laboratório (Saqui et al., 2008; Rocha et al., 2008; Sá et al., 2014c; Poretz et al., 2017) e de avaliações de tendências da dinâmica populacional das fases dos ciclos de desenvolvimentos do psílideo-de-concha e *P. bliteus* por cenários de simulação numérica (Kodaira et al., 2007; Pessoa et al., 2008, 2009), entre outros (Sá et al., 2014c). Os resultados de monitoramentos de armadilhas adesivas dispostas em áreas de hortos florestais de São Paulo e de Minas Gerais, também obtidos, determinaram as flutuações populacionais das pragas e parasitoides liberados em hortos florestais de municípios de SP e de MG em anos consecutivos (Serafim et al., 2011; Vidal et al., 2012; Pessoa et al., 2013d, 2014b, 2015a; Mafra et al., 2015; Sartori et al., 2015; Poretz et al., 2016; Souza et al., 2016; Carvalho Neto et al., 2017; Wilcken et al., 2019). Assim, além de permitir melhor conhecer esses insetos e de garantir as criações em condições controladas, permitiram a determinação de períodos e fatores climáticos de maior influência à ocorrência de picos populacionais do percevejo bronzeado, os quais subsidiaram zoneamentos georreferenciados de regiões brasileiras prioritárias para intensificação de ações de controle deste inseto em áreas produtoras de eucalipto. Nesse contexto, o LQCL foi parceiro técnico das atividades realizadas em ações gerenciais estratégicas locais da Agenda INTEGRO da Embrapa Territorial, no período de 2016 a 2019, as quais, entre outras pragas-alvo de diversos cultivos, incluíram a realização desses zoneamentos territoriais de áreas favoráveis ao percevejo-bronzeado, acompanhando a dinâmica espaço-temporal de áreas com o cultivo, bem como incorporando atualizações metodológicas (Pessoa et al., 2018, 2019d; Siqueira et al., 2020). Essas ações gerenciais disponibilizaram mapas georreferenciados no Geoinfo da Embrapa.

Outras atividades de pesquisa e desenvolvimento com foco no cultivo de eucalipto foram também estudadas e disponibilizadas pelo LQCL no projeto Desenvolvimento de Métodos e Aplicativos para sistemas quarentenários em apoio à defesa agropecuária nas culturas de citros, cana-de-açúcar, eucalipto e flores/plantas ornamentais no estado de São Paulo (CNPQ 578283) (Embrapa SEG 03.09.00.059.00.00; financiado pelo edital CNPq/Mapa n. 64/2008), realizado de 2009 a 2011. Nele, o sistema informatizado SysRiskQuarantine desenvolvido também disponibilizou bases de dados com informações para pragas quarentenárias ausentes (PQAs) do cultivo de eucalipto, entre outras relativas às suas pragas presentes, às localizações de áreas de cultivos em municípios paulistas e suas respectivas informações climáticas (Mazuchi et al., 2010; Pessoa et al., 2010a, 2010b, 2010c; Giraldi et al., 2011b; Sá et al., 2014a). No mesmo projeto foi desenvolvido o sistema informatizado MonitCartão, que organizou e facilitou a recuperação das informações periódicas das quantidades de insetos-pragas, e seus parasitoides, identificados em cartões-armadilhas- adesivas-amarelos utilizados em monitoramentos quinzenais de hortos florestais (Lazarin et al., 2012). Também foram determinadas correlações entre as fases ninfais do psilídeo-de-concha e os seus respectivos tamanhos de conchas (Stivanelli et al., 2009). Esse resultado possibilitou desenvolver o protótipo do sistema informatizado ContaConcha, que estima as quantidades de instares ninfais do psilídeo-de-concha, disponíveis em amostras de folhas, pelas medições dos tamanhos de conchas fotografados; possibilitando determinar o momento mais propício às liberações do bioagente, dada a preferência do parasitoide *P. bliteus* por estádios ninfais específicos (Sá et al., 2014c). O projeto também disponibilizou simulações numéricas para avaliação de tendências de desenvolvimento das diferentes fases do ciclo de vida do percevejo-bronzeado, considerando sua biologia em diferentes cultivares de eucalipto (Lazarin et al., 2011a, 2011b), entre outros resultados obtidos (Giraldi et al., 2012; Sá et al., 2014b).

Para se inferir os benefícios advindos dos resultados citados, Wilcken et al. (2018) reportaram perdas de produção de madeira na ordem de US\$ 600 milhões, causadas pelas presenças do psilídeo-de-concha, percevejo-bronzeado, vespa-da-galha e do besouro-do-eucalipto *Gonipterus platensis* (Coleoptera: Curculionidae). Ainda segundo Wilcken et al. (2017), em 2012 somente o percevejo-bronzeado infestou 245 mil ha de eucaliptos, reduzindo de 10-15% a produção de madeira e gerando perdas de US\$330 milhões até 2015.

Citam-se também as capacitações de recursos humanos viabilizadas pelos projetos, pelas quais vários bolsistas de graduação, de diferentes cursos e universidades, e colaborações àqueles ligados a Programas de Pós-graduação foram realizadas (Firmino et al., 2004; Kodaira et al., 2007; Saqui et al., 2008; Rocha et al., 2008; Stivanelli et al., 2009; Ferreira Filho et al., 2015; Poretz et al., 2017). Acrescentam-se ainda as divulgações diretas dos resultados em reuniões técnicas do PROTEF/

IPEF, das quais participaram pesquisadores e as principais empresas do setor florestal do país. Outros resultados também estão disponíveis em literatura técnica e na BDPA-Embrapa.

## ESTRATÉGIAS PARA O CONTROLE DE INSETOS-PRAGAS EXÓTICAS DE GRÃOS, FIBRAS E CANA-DE-AÇÚCAR

No contexto das estratégias para o controle de insetos-pragas exóticas de grãos, vários trabalhos também foram disponibilizados.

Entre os estudos voltados para o controle de pragas da cultura de milho, citam-se os conduzidos para o controle biológico de lepidópteros pela micro-vespa *Trichogramma pretiosum* Riley (Hymenoptera: Trichogrammatidae) realizados por pesquisador do LQCL em conjunto com a ESALQ/USP (Sá, 1991; Sá et al., 1993; Sá; Parra, 1993, 1994b). Esses estudos objetivaram o controle da fase de ovos das lagarta-do-cartucho ou lagarta-militar *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), a lagarta-da-espiga-do-milho *Helicoverpa zea* (Boddie) (Lepidoptera: Noctuidae) e a traça-da-farinha *Anagasta kuehniella* (Zeller) (Lepidoptera: Pyralidae), disponibilizando informações biológicas sobre a biologia e potencial de danos dos insetos abordados, bem como sobre interações com *T. pretiosum* e o efeito do número indivíduos e de intervalos de liberações desse parasitoide no controle por parasitismo dos insetos-pragas alvo ou na capacidade de dispersão do parasitoide; informações estas imprescindíveis para viabilizar estratégias de manejo de pragas por esse organismo (Sá, 1991; Sá et al., 1993, 1998a, 1998b, 1999a; Sá; Parra, 1993, 1994a).

Tratando-se de pragas polífagas, com potencial de ataque a outros cultivos (entre eles, algodão, soja, tomate, cana-de-açúcar), procurou-se viabilizar conhecimento sobre o controle exercido por *T. pretiosum* como agente de controle biológico, à época, e uma das bases de trabalhos que deram continuidade a esses estudos (Parra et al., 2002a, 2002b; Pratisoli et al., 2003) até torná-lo acessível ao produtor (inclusive de orgânicos), nas várias opções de produtos formulados à base desse ingrediente ativo microbiológico e hoje existente em marcas comerciais distintas. Watanabe et al. (1995) também disponibilizaram informações sobre pragas e inimigos naturais presentes, em 1993 e 1994, na cultura do milho da região de Guaíra, SP; grande área paulista produtora do cultivo em sistema de monocultivo irrigado por pivô central. Esses autores disponibilizaram informações de percentuais de ocorrência das pragas, relacionando-os à idade da cultura, uso de agrotóxicos e presença de inimigos naturais, apontando *S. frugiperda* como praga chave e predadores conhecidos por tesourinhas *Doru* sp. (Scudder) como principal inimigo natural presente na cultura, porém com a necessidade de avaliações de liberações complementares de *T. pretiosum* para o controle da praga.

Estudos também foram conduzidos com a participação de pesquisadores do LQC e LEF para avaliar o efeito de biopesticida formulados a base em outros organismos benéficos. Entre eles, citam-se os realizados por Watanabe et al. (1996), que avaliaram o efeito da formulação de *Baculovirus anticarsia* sobre o percevejo *Podisus nigrispinus* Dallas (Hemiptera: Pentatomidae), conhecido predador da lagarta da soja *Anticarsia gemmatalis* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae), da lagarta do algodão (curuquerê) *Alabama argilacea* (Hübner) (Lepidoptera: Erebidae) e da traça-do-tomateiro *Tuta absoluta* (Meyrick) (Lepidoptera: Gellechidae) entre outros, indicando presença de efeito adverso do produto sobre populações do predador. Estudos posteriores, fundamentados nesse e em outros resultados disponibilizados pela Embrapa Meio Ambiente, foram considerados nos trabalhos da Embrapa Soja, que disponibilizou formulações à base desse organismo, hoje existentes no mercado e utilizado em 1 milhão ha de soja do país.

O efeito de tratamentos não-convencionais, à época realizados à base do produto natural denominado *Efficient Microorganisms* (EM), foram também avaliados por pesquisadores do Laboratório de Entomologia da Unidade, ainda na década de 90, sobre organismos benéficos presentes nas partes aéreas dos cultivos de milho e de feijão, indicando que, concomitante ao envelhecimento da cultura de milho os tratamentos com EM mostravam maior proporção de inimigos naturais, enquanto para feijão os resultados não se mostraram conclusivos pelo pouco tempo de observação do produto da cultura (Morsoleto; Watanabe, 1997; Watanabe; Morsoleto, 1997).

Em anos mais recentes, grande atenção tem sido dada ao controle de *Helicoverpa armigera* Hübner (Lepidoptera: Noctuidae), praga quarentenária ausente até ser identificada no país na safra 2012/2013, quando gerou extensos danos em importantes áreas produtoras nacionais, mais precisamente em cultivos de algodão, soja e milho dos estados da Bahia, Goiás e Mato Grosso. O elevado potencial de dispersão do inseto pode ser evidenciado, dado que rapidamente foi acometendo áreas de cultivos hospedeiros em todo o território nacional. O impacto da presença desse inseto-praga foi avassalador, exigindo alternativas de controle imediato. Nesse contexto, a contribuição técnica da Embrapa Meio Ambiente também pode ser destacada nessa situação de emergência fitossanitária a que o país esteve sujeito.

Informações sobre *H. armigera*, já prospectadas e organizadas no BD de PQA do sistema SysRiskQuarantine (Giraldi et al., 2011a, 2011b; Pessoa et al., 2010a) já citado, foram rapidamente recuperadas, analisadas, aprofundadas e utilizadas por pesquisadores do LQCL em estudos prospectivos do comportamento desse inseto em áreas produtoras do estado de São Paulo e Brasil (Pessoa et al., 2013a, 2013b, 2013c). Neles foram considerados os cultivos hospedeiros de algodão, soja, milho, feijão e tomate, bem como os cultivos hospedeiros secundários perenes de eucalipto e café. Desse modo, em 19 e 23 junho/2013 a Embrapa Meio Ambiente pode contribuir imedia-

tamente disponibilizando esses resultados e duas Notas Técnicas (NTs) à Diretoria Executiva (DE). Nelas, com base no ponto de vista de risco fitossanitário e de aspectos biológicos do inseto e das áreas já atacadas no Brasil identificados nos estudos, os pesquisadores do LQCL relataram a possibilidade de dispersão do inseto das áreas inicialmente atacadas para outros estados com cultivos hospedeiros preferenciais e sinalizaram as alternativas de controle do inseto, com foco no controle biológico por parasitoides e predadores já identificados em literatura internacional pelo LQCL. As NTs enviadas também disponibilizavam os resultados de estudos inéditos realizados pelo LQCL apontando estimativas do número de gerações de *H. armigera*, passíveis de ocorrência a partir da chegada dos insetos adultos em diferentes meses de plantios de cinco cultivos hospedeiros (soja, algodão, milho, feijão, tomate), considerando duas regiões climáticas diferenciadas de importantes áreas produtoras do estado de São Paulo (Pessoa et al., 2013a, 2013b, 2013c). Uma das NTs foi direcionada como uma contribuição da Embrapa Meio Ambiente para as estratégias de proposição de uma carta consulta para a formulação do Arranjo sobre *H. armigera* e, assim, ofereceu conhecimento técnico para contribuir com as atividades estratégicas da Embrapa e Mapa para o controle dessa praga exótica.

Ainda em 2013 foram iniciados estudos no LQCL para mais bem entender fatores que potencialmente estariam contribuindo com a dispersão de *H. armigera* no país, integrando diferentes informações para disponibilizar a localização das áreas municipais aptas a serem acometidas pela praga também no estado de São Paulo, com base na localização de áreas produtoras de cultivos hospedeiros anuais (algodão, soja, milho, feijão e tomate) e perenes (eucalipto e café), identificando áreas de cerrado paulistas e a ocorrência de massas de ar brasileiras (de verão e inverno) como facilitadoras da dispersão do inseto para o interior do estado de São Paulo e, potencialmente, para outras áreas nacionais (Pessoa et al., 2013a, 2013b, 2013c, 2014a).

Nesse mesmo período, a Embrapa Meio Ambiente passou a integrar importantes fóruns voltados para viabilizar alternativas para aumentar o conhecimento sobre *H. armigera* e para conter danos desse problema nacional. Assim, pesquisadores do LQCL foram integrados às atividades da Caravana Embrapa de alerta para ameaças fitossanitárias – *Helicoverpa armigera*, coordenada pela DE/Embrapa, para organizar e disponibilizar informações técnicas para capacitar produtores, pesquisadores e extensionistas, de diversas áreas produtoras de cultivos hospedeiros do inseto presentes no país, na identificação, monitoramento e controle de *H. armigera*. Desse modo, pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente, entre eles do LQCL, elaboraram materiais técnicos solicitados, alguns dos quais compuseram o material das palestras presenciais ministradas pela caravana Embrapa em todo o Brasil. Nas atividades dessa caravana realizadas no estado de São Paulo, nos municípios de Avaré, Assis e Ribeirão Preto no período de 10 a 12 de março de 2014, a DE/Embrapa contou com

o apoio logístico da Embrapa Meio Ambiente e com o apoio local municipal de instituições de ensino e de pesquisas do estado de São Paulo (Caravana..., 2014). Nessa caravana paulista, quatro pesquisadores (sendo três do LQCL) participaram das atividades técnicas, respondendo aos questionamentos diretos de produtores, assim como outros empregados da equipe de apoio da Unidade, que contribuíram com o apoio logístico local e divulgações na mídia.

Ainda relacionado a *H. armigera*, a Embrapa Meio Ambiente também se fez presente no *Workshop* Ameaças Fitossanitárias: construção de uma política de combate à *Helicoverpa armigera* e outras pragas exóticas para o Estado de São Paulo, promovido pela Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo, por meio da Coordenadoria de Defesa Agropecuária em setembro/2013, contribuindo com palestra oferecendo resultados de estudos do LQCL sobre a distribuição geográfica potencial de *H. armigera* no Estado de São Paulo e perspectivas para programas de controle biológico da praga. Tratou-se de importante evento, com participação de autoridades (federais, estaduais e municipais), de fiscais agropecuários (federal e estadual), de produtores e de pesquisadores, extensionistas e técnicos agrícolas de todo o Brasil, entre outros públicos, que assim ampliaram o conhecimento e viabilizaram discussão técnica para a construção coletiva de uma política de combate à *H. armigera*, entre outras pragas agrícolas de interesse do estado.

Posteriormente, a Unidade também participou da proposta do projeto de criação do Arranjo *Helicoverpa*, Mosca Branca e Bicudo, coordenado pela Embrapa Cerrados, contribuindo com a carteira temática da Embrapa sugerida para esse arranjo e, posteriormente, com projetos de pesquisas nela desenvolvidos. Porém, mesmo antes desse arranjo estar sendo implementado, pesquisadores do LQCL deram continuidade aos estudos já iniciados pela Unidade, estabelecendo uma parceria com a Embrapa Territorial (então Embrapa Gestão Territorial) no final de 2014, a qual possibilitou incorporar aos trabalhos em andamento no LQCL os recursos de técnicas de geoprocessamento com foco na vigilância territorial. Assim, a partir de 2016, as atividades dos estudos informais com foco em *H. armigera* foram oficializadas na agenda INTEGRRO da Embrapa, passando a ser desenvolvidas pela parceria de ambas unidades em Ações Gerenciais Estratégicas Locais da Embrapa Territorial (2016 a 2019) e da Embrapa Meio Ambiente (2016) no INTEGRRO. Vários estudos realizados no âmbito dessas ações gerenciais ofereceram zoneamentos territoriais considerando tanto a evolução da localização e áreas plantadas com os cultivos hospedeiros preferenciais e secundários de *H. armigera* no estado de São Paulo e Brasil, quanto de áreas mais favoráveis ao estabelecimento do inseto-praga (Pessoa et al., 2015b, 2016c, 2016e; Mingoti et al., 2019), contribuindo com estratégias de defesa fitossanitária.

No âmbito das atividades de pesquisa realizadas já em projetos do Sistema Embrapa de Gestão (SEG) pertencentes ao Arranjo *Helicoverpa*, Mosca Branca e Bicudo

(posteriormente renomeado para “Armigera – manejo integrado de lepidópteros-pragas com foco em *Helicoverpa*”), o LQCL e LEF da Embrapa Meio Ambiente disponibilizaram vários resultados. Entre eles, no projeto Seleção de metabólitos secundários de plantas com potencial uso no manejo de *Helicoverpa armigera* (Embrapa SEG 03.13.14.002.00.00), o controle alternativo de *H. armigera* e *Anticarsia gemmatalis* foi avaliado através do uso de compostos secundários de plantas e inibidores de proteases sintéticos. Observou-se que o inibidor de serino-proteases reduziu o ganho de peso de lagartas de *H. armigera* e causou deterrência alimentar a esses insetos (Lemes et al., 2015). Os extratos vegetais de *Clerodendrum splendens* e de *Vernonathura westiniana* causaram altas taxas de mortalidade em lagartas de *A. gemmatalis* (Marinho-Prado et al., 2018). Dentre nove óleos essenciais avaliados sobre lagartas de *A. gemmatalis* e *H. armigera*, observou-se bioatividade do óleo de basilicão a ambas as espécies, que pode ser devida à ação de seus compostos majoritários identificados (linalol, 1,8-cineol, cânfora e eugenol) (Marinho-Prado et al., 2019).

Por sua vez, no projeto Níveis de dano econômico e ações de controle biológico para o manejo de *Helicoverpa armigera* nos sistemas de produção agrícolas (ND E IN HA) (Embrapa SEG 02.13.14.003.00.00), liderado pela Embrapa Agropecuária Oeste, a participação de pesquisadoras do LQCL deu-se na responsabilidade do Plano de Ação 5 e em várias atividades voltadas para a realização de simulações numéricas, visando disponibilizar tendências da dinâmica populacional de fases do ciclo de *H. armigera* em diferentes cultivos (soja, milho, feijão, algodão, trigo e dieta artificial) e determinar o Nível de Ação (NA) e o Nível de Dano Econômico (NDE) desse inseto. Estudos laboratoriais, conduzidos pela Embrapa Agropecuária Oeste, disponibilizaram informações sobre a biologia de *H. armigera* em algodão cv. CNPA BRS293, soja cv. BMX Potência RR, milho cv. BRS1010, trigo cv. BR-18 e dieta artificial (Gomes et al., 2017), enquanto estudos laboratoriais realizados pelo LEF Embrapa Meio Ambiente disponibilizaram a biologia de *H. armigera* em feijão cv. Pérola (Luchini et al., 2017a, 2017b). Esses resultados foram parte da base biológica utilizada nos simuladores numéricos desenvolvidos pelo LQCL e que disponibilizaram resultados de estudos de cenários da dinâmica das diferentes fases de desenvolvimento do inseto nesses hospedeiros, destacando diferenças importante para o manejo integrado do inseto (Teixeira et al., 2017; Luchini et al., 2018; Pessoa et al., 2020a). Os resultados obtidos indicaram, conforme as quantidades de machos e de fêmeas iniciais avaliadas, os períodos de maior disponibilidade e quantidade de indivíduos dos estágios das fases do ciclo de vida do inseto, para subsidiar criações laboratoriais (Teixeira et al., 2017; Luchini et al., 2018; Pessoa et al., 2020a). Ainda em atividade conduzida por pesquisadora do LQCL, no âmbito do mesmo plano de ação e projeto, foram disponibilizadas informações sobre o tempo de desenvolvimento (em dias) esperado para cada fase do ciclo de vida de *H. armigera*, considerando condições climáticas dos municípios

de Dourados e de Ponta Porã, grandes produtores de soja do estado do Mato Grosso do Sul, por demandas térmicas do inseto-praga (Pessoa et al., 2019a). Essa informação orienta períodos de maior disponibilidade de fases imaturas específicas para o manejo integrado da praga local, com foco no uso de controle biológico inundativo em campo. Além desses resultados, experimentos de campo conduzidos pela Embrapa Agropecuária Oeste, também no mesmo projeto, viabilizou informações que possibilitaram a pesquisadores do LQCL Embrapa Meio Ambiente e da Embrapa Agropecuária Oeste posteriormente determinar o Nível de Ação (NA) e o Nível de Dano Econômico (NDE) de *H. armigera* em período vegetativo da soja BMX-Potência RR, amplamente utilizada no país, para as condições climáticas da safra de 2016/2017 de Ponta Porã, MS (Pessoa et al., 2019a).

Além dos estudos realizados para *H. armigera* nas ações gerenciais estratégicas das agendas INTEGRO locais das Embrapa Meio Ambiente e Embrapa Territorial, já citadas, estas ações também oportunizaram zoneamentos territoriais de áreas favoráveis ao estabelecimento de *Chilo partellus* e *Prodiplotis longifila*, também pragas de grãos e cana-de-açúcar. *Chilo partellus* (Swinhoe) (Lepidoptera: Pyralidae) é praga quarentenária ausente (PQA) no país, com ataques no exterior aos cultivos de milho, sorgo, arroz e cana-de-açúcar. Os estudos realizados disponibilizaram informações biológicas, entre outras, e as áreas de maior potencial ao estabelecimento do inseto, considerando localização de áreas urbanas, prováveis vias de ingresso terrestres, localizações de portos, rodovias e aeroportos e dos postos de fiscalização do VIGIAGRO, bem como detalhamentos para estados com maior potencial de ingresso presentes nas regiões Norte, Nordeste, Sul, Sudeste e Centro-Oeste do país (Holler et al., 2015a, 2015b, 2015c, 2016a). Estudos de estimativas numéricas de tempos de desenvolvimentos de *C. partellus* e de seus três potenciais agentes de controle biológico, a saber *Cotesia flavipes* (Cameron) (Hymenoptera: Braconidae) (parasitoide de ovos), *Trichogramma chilonis* (Ishii) (Hymenoptera: Trichogrammatidae) (parasitoide de lagartas) e de *Tetrastichus howardi* (Ollif) (Hymenoptera: Eulophidae) (parasitoide de pupas), também foram disponibilizados considerando demandas térmicas dos insetos e as condições climáticas de áreas indicadas pelos zoneamentos realizados como favoráveis a entrada e ao estabelecimento de *C. partellus* pela região Norte brasileira (nos estados do Amapá e Roraima) (Pessoa et al., 2016b). Os estudos realizados para *P. longifila* (Holler et al., 2016b; Mingoti et al., 2017) já foram apresentados neste capítulo, quando considerados cultivos de fruteiras com foco em pragas de citros.

## CONTRIBUIÇÕES TÉCNICAS PARA CAPACITAÇÃO DE DIFERENTES PÚBLICOS-ALVO SOBRE PRAGAS AGRÍCOLAS E CONTROLE BIOLÓGICO

No que tange a outros recursos de capacitação voltadas à diferentes públicos-alvo sobre pragas agrícolas e controle biológico, além daqueles já relatados sobre a capacitação de bolsistas em projetos de pesquisa específicos, pesquisadores do LQCL e LEF ministraram várias palestras ou coordenaram mesas redondas em eventos de todo o país e no exterior. Também ministraram palestras e aulas em curso de Mestrado em Agroecologia e Desenvolvimento Rural da Pós-Graduação em Desenvolvimento Rural Sustentável da Universidade Federal de São Carlos campus de Araras de 2011 a 2013, na Disciplina ADR-103 Manejo Ecológico de Pragas e Doenças (de responsabilidade dos Prof Dr. Paulo Botelho/UFSCAR Araras e Dr Luiz Alexandre N. de Sá/LQCL-Embrapa Meio Ambiente); curso este realizado pela parceria celebrada entre a Embrapa Meio Ambiente e UFSCAR. De igual modo, ministraram palestras em cursos oferecidos à estudantes de graduação das Unicamp, Unesp, ESALQ/USP, IB, IAC, entre outros oferecidos pela Embrapa para o SNPA e internos.

Do mesmo modo, pesquisadores do LQCL contribuíram, desde o início de sua implantação, para com as atividades de internalização na Embrapa sobre os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU (via Rede ODS). Também contribuíram para atividades de educação ambiental, oferecidas pelos Programa Embrapa Escola e nos projetos de Educação Ambiental da Unidade, tendo participado da elaboração de vários materiais e recebido estudantes de todo o país, inclusive na “Embrapa de portas abertas” realizada pela Embrapa Meio Ambiente.

Pesquisadores do LQCL e LEF também participaram de eventos reconhecidos internacionalmente, proferindo palestras, apresentando trabalhos e ou participando ou coordenando mesas redondas (CBE, SINCOBIOL, CBF, entre outros). Também receberam profissionais da área de agronomia e florestal de diferentes instituições internacionais (CIRAD, AENOR, IITA, INTA, USDA, entre outras) favorecendo o intercâmbio de conhecimento. Essas ações possibilitaram também uma maior cooperação técnica nos projetos de pesquisas realizados.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os serviços técnicos quarentenários e as ações de pesquisas aqui apresentados mostram parte do empenho da Embrapa Meio Ambiente e os benefícios advindos de pesquisa aplicadas ao controle de pragas exóticas ingressas no país ou passíveis de entrada iminente (como as quarentenárias ausentes). Os benefícios da pesquisa explo-

ratória preventiva e da bioprospecção de inimigos naturais (exóticos e nativos) foram apresentados como alternativas de controle biológico a serem incorporadas aos Programas de Manejo Integrado de Pragas de várias culturas, dado que promovem alternativas de produtos biológicos e de controle biológico clássicos para cultivos agrícolas e florestais. Diversos estudos básicos conduzidos pelos LQCL e LEF, subsidiaram a condução de trabalhos desta natureza no país, quase sempre em colaboração com outras instituições nacionais e internacionais que se dedicam a este tema.

Destaca-se também a relevância das ações de pesquisa e a colaboração internacional e nacional com distintas instituições no serviço quarentenário propriamente dito, no processo de introdução e exportação de agentes de controle biológico, que assim contribuem para a agricultura internacional. Estas ações além disso, permitiram a geração de alertas preventivos, como também subsidiar planos de emergência e controle. De igual modo, os resultados obtidos promoveram conteúdo técnico para disseminar e favorecer a maior conscientização pública sobre a sustentabilidade ambiental da agricultura e a capacitação e formação de recursos humanos do país.

## REFERÊNCIAS

- ALENCAR, J. A. de; MORAES, G. A. de; DELALIBERA JUNIOR, I.; ARAÚJO, W. F. Métodos de criação de ácaros fitoseídeos (Acari: Phytoseiidae), predadores do ácaro verde da mandioca. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANDIOCA, 6., 1990, Londrina. **Programação e resumos...** [S.l.]: Sociedade Brasileira de Mandioca, 1990. p. 36
- ALERTA quarentenário: atenção para a cochonilha rosada. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, Laboratório de Quarentena Costa Lima; Brasília: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1998. 1 fôlder.
- ALERTA quarentenário: atenção para os sintomas de ataque da cochonilha rosada. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, Laboratório de Quarentena Costa Lima; Brasília: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1998. Cartaz.
- ALERTA quarentenário: cochonilha rosada, *Maconellicoccus hirsutus* (Green). Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente; Brasília: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, SDA-DDIV, 1998. Cartão de identificação.
- ALVARENGA, C. D.; BRITO, E. S.; LOPES, E. N.; SILVA, M. A.; ALVES, D. A.; MATRANGOLO, C. A. R.; ZUCCHI, R. A. Introdução e recuperação do parasitoide exótico *Diachasmimorpha longicaudata* (Ashmead) (Hymenoptera: Braconidae) em pomares comerciais de goiaba no norte de Minas Gerais. **Neotropical Entomology**, v. 34, n. 1, p. 133-136, 2005.
- ALVES, S. B. (ed.) **Controle microbiano de insetos**. Piracicaba: FEALQ, 1998. 1163 p. (Biblioteca de Ciências Agrárias Luiz de Queiroz, 4).
- AMBROSANO, G. M. B.; STIMAC, J. L.; SILVEIRA-NETO, S.; IGUE, T.; NAGAI, V. Modelo matemático para simulação do controle biológico da broca-da-cana com o parasitoide *Trichogramma galloi*: I. modelos conceituais. **Bragantia**, v. 55, n. 2, p. 371-382, 1996.
- AUGUSTO, N. G.; SOUZA, C. N. de; SÁ, L. A. N. de. Criação em laboratório da praga *Diaphorina citri* em mudas hospedeiras de *Murraia paniculata*. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 10., 2016, Campinas. **Anais...** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2016. Resumo 16410. 11 p.
- AUSTRÁLIA. Department of Agriculture and Water Resource. **Northern Australia Quarantine Strategy (NAQS)**: last reviewed in February 22, 2017. 2017.
- BARBEDO, J. G. A.; KOENIGKAN, L. V.; HALFELD-VIEIRA, B. A.; COSTA, R. V.; NECHET, K. de L.; GODOY, C. V.; LOBO JUNIOR, M.; PATRICIO, F. R. A.; TALAMINI, V.; CHITARRA, L. G.; OLIVEIRA, S. A. S.; ISHIDA, A. K. N.; FERNANDES, J. M. C.; SANTOS, T. T.; CAVALCANTI, F. R.; TERAQ, D.; ANGELOTTI, F. Annotated Plant Pathology Databases for Image-Based Detection and Recognition of Diseases. **IEEE Latin America Transactions**, v. 16, p. 1749-1757, 2018.
- BARBOSA, F. F. L.; ALEXANDRE, J. R.; MORAIS, E. F.; LOHMANN, T. R.; SILVA, M. L. da. **Priorização de pragas quarentenárias ausentes: metodologia e lista das 20 pragas mais importantes**. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2017. 24 p. il. (Embrapa Mandioca e Fruticultura. Documentos, 220).
- BARBOSA, F. R.; SÁ, L. A. N. de. **Cochonilha rosada: uma ameaça ao Brasil**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2003. 6 p. 1 folder.

- BARIANI, A.; JESUS, C. R. de; LIMA, A. L.; PARANHOS, B. A. J.; ADAIME, R.; PEREIRA, J. C.; CARDOSO, E. K. de A.; ALMEIRA, R. P. de. Estabelecimento de colônia do parasitoide *Fopius arisanus* Sonan (Hymenoptera: Braconidae) sobre a mosca-da-carambola em condições de laboratório. Macapá, AP: Embrapa Amapá, 2019. 22 p. (Embrapa. Documentos, 102).
- BATISTA, I. C. A.; BOARI, A. de J.; KAUFFMANN, C. M.; NECHET, K. de L. *Colletotrichum plurivorum* causes anthracnose on okra in Brazil. *Journal of Plant Pathology*, v. 102, n. 4, article 1331, 2020.
- BOARI, A. de J.; QUADROS, A. F. F.; NECHET, K. de L. *Rhizoctonia solani* AG 1-IA causing leaf blight in oil palm seedlings in Brazil. *Australian Plant Disease Notes*, v. 12, article 42, 2017.
- BOARI, A. de J.; QUADROS, A. F. F.; NECHET, K. de L. *Rhizoctonia solani* AG1-IA causing leaf blight in *Erythrina indica* var. *picta* in Brazil. *Summa Phytopathologica*, v. 44, n. 3, p. 293-294, 2018.
- BOAVENTURA, V. de J.; RINGENBERG, R.; LEDO, C. A. da S. Ciclo biológico de *Mononychellus tanajoa* (Bondar) em acessos de *Manihot* spp. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE RECURSOS GENÉTICOS, 2., 2012, Belém, PA. *Anais...* Brasília, DF: Sociedade Brasileira de Recursos Genéticos, 2012. 1 CD-ROM.
- BONATO, O.; NORONHA, S. A. C.; MORAES, G. de. Distribution et échantillonnage des populations de *Amblyseius manihoti* (Acari: Phytoseiidae) sur manioc au Brésil. *Journal of Applied Entomology*, v. 123, n. 9, p. 541-546, 1999a.
- BONATO, O.; NORONHA, A. C. da S.; MORAES, G. J. de; LUCCHINI, F. Estrutura etária e flutuação populacional de *Amblyseius manihoti* (Acari: Phytoseiidae) sobre mandioca. *Revista Científica Rural*, v. 5, n. 4, p. 56-61, 2000a.
- BONATO, O.; SANTAROSA, P. L.; RIBEIRO, G.; LUCCHINI, F. Growth and development of *Tetranychus ogmophallos* Ferreira & Fletchmann on three different leguminous. In: SYMPOSIUM ON POPULATION DYNAMICS OF PLANTS INHABITING MITES, 1999, Kyoto. *Abstracts...* Kyoto, 1999c. p. 58.
- BONATO, O.; SANTAROSA, P. L.; RIBEIRO, G.; LUCCHINI, F. Suitability of three legumes for development of *Tetranychus ogmophallos* (Acari: Tetranychidae). *Florida Entomologist*, v. 83, n. 1, p. 3, 2000b.
- BOTELHO, P. S. M. Quinze anos de controle biológico da *Diatraea saccharalis* utilizando parasitoides. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 27, s/n, p. 255-262, abr. 1992. Edição especial.
- BOTELHO, P. S. M.; PARRA, J. R. P.; CHAGAS NETO, J. F.; OLIVEIRA, C. P. B. Associação do parasitoide de ovos *Trichogramma galloi* Zucchi (Hymenoptera: Trichogrammatidae) e do parasitoide larval *Cotesia flavipes* (Cam.) (Hymenoptera: Braconidae) no controle de *Diatraea saccharalis* (Fabr.) (Lepidoptera: Crambidae) em cana-de-açúcar. *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil*, v. 28, n. 3, p. 491-496, 1999.
- BUENO, R. C. O. F.; BUENO, A. F.; MOSCARDI, F.; PARRA, J. R. P.; HOFFMANN-CAMPO, C. B. Lepidopteran larva consumption of soybean foliage: basis for developing multiple-species economic thresholds for pest management decisions. *Pest Management Science*, v. 67, p. 170-174, 2011.
- BUENO, R. C. O. F.; PARRA, J. R. P.; BUENO, A. F. *Trichogramma pretiosum* parasitism and dispersal capacity: a basis for developing biological control programs for soybean caterpillars. *Bulletin of Entomological Research*, v. 102, n. 1, p. 1-8, 2012. p. 1-8.

BUENO, V. H. P.; VAN LENTENEN, J. C. Predadores no controle biológico de pragas: sucessos e desafios IN: HALFELD-VIEIRA, B. de A.; MARINHO-PRADO, J. S.; NECHET, K. de L.; MORANDI, M. A. B.; BETTIOL, W. (eds.). **Defensivos agrícolas naturais usos e perspectivas**. Brasília, DF: Embrapa, 2016. p. 359-397.

CALDERARI, N. P.; PESSOA, M. C. P. Y.; MOMESSO, C. M.; NEVES, M. F. de O.; SÁ, L. A. N. de Subsídios à criação de *Diaphorina citri* em tubetes de limão-cravo para a manutenção de *Tamarixia radiata* em condições de laboratório. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 10., 2016, Campinas. **Anais...** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2016. RE Nº 16420. 12 p.

CAMPANHOLA, C.; MORAES, G. J. de; SÁ, L. A. N. de. Review of IPM in South America. In: MENGECH, A. N.; SAXENA, K. L.; GOPALAN, H. N. B. (ed.). **Integrated pest management in the tropics: current status and future prospects**. Chichester: J. Wiley, 1995. p. 121-152.

CAPALBO, D. M. F.; SÁ, L. A. N. de. Legislação brasileira para uso de agentes de controle biológico. In: VILELA, E. F.; FERNANDES, J. B.; PARRA, J. R. P.; MOSCARDI, F.; RABINOVITCH, L. (ed.). **Controle biológico e feromônios de insetos no âmbito do agronegócio**. Viçosa: UFV, 1998. p. 43-45.

CARAVANA Embrapa de alerta para ameaças fitossanitárias estará em Assis dia 12. **AssisNews**, 6 mar. 2014. Disponível em: <https://www.assisnews.com.br/editoriais/geral/2014/03/caravana-embrapa-de-alerta-para-ameacas-fitossanitarias-estara-em-assis-dia-12.html>. Acesso em: 10 abr. 2022.

CARVALHO, R. da S. **Estudos de laboratório e de campo com o parasitóide exótico *Diachasmimorpha longicaudata* Ashmead (Hymenoptera: Braconidae) no Brasil**. Piracicaba, SP: Instituto de Biociências-ESALQ/USP. 2003. 218 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

CARVALHO, R. da S. **Impacto da introdução do parasitóide exótico *Diachasmimorpha longicaudata* sobre o complexo de parasitoides nativos de moscas-das-frutas (Tephritidae) no Recôncavo Baiano**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2004. 6 p. (Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical. Comunicado Técnico, 98).

CARVALHO, R. da S.; NASCIMENTO, A. S. Avaliação do controle biológico de moscas-das-frutas no Brasil utilizando o parasitóide exótico *Diachasmimorpha longicaudata* (Hymenoptera: Braconidae). In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 7., 2001, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: UFPA, 2001. p. 625-630.

CARVALHO, R. da S.; NASCIMENTO, A. S.; MATRANGOLO, W. J. R. **Metodologia de criação do parasitóide exótico *Diachasmimorpha longicaudata* (Hymenoptera: Braconidae), visando estudos em laboratório e em campo**. Cruz das Almas: EMBRAPA-CNPMPF, 1998. 16 p. (EMBRAPA-CNPMPF, Circular Técnica, 30).

CARVALHO, V. C.; SAWAZAKI, H. E.; GONÇALVES, C. R. N. C. B.; SINGER, M. M. M.; SÁ, L. A. N. de; VEGA, R. F. A.; ALCÂNTARA, M. Q.; COLOMBO, C. A. Análises moleculares de bactérias e fungo em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 4., 2010, Campinas. **Anais...** Campinas: IAC: ITAL; Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2010. 1 CD-ROM.

CARVALHO NETO, H. C.; SEVERI, D. R.; VOMERO, P. A. S.; SILVA, L. F.; SÁ, L. A. N. de; WILCKEN, C. F. Flutuação populacional de *Glycaspis brimblecombei* e seu parasitóide *Psyllaephagus bliteus* e *Thaumastocoris peregrinus* em plantações de eucalipto. In: SIMPÓSIO EM PROTEÇÃO DE PLANTAS, 5., 2017, Botucatu. **Anais...** Botucatu: FCA/UNESP: FEPAF, 2017.

CESNIK, R.; BETTIOL, W. Potencial fitopatogênico de *Colletotrichum gloeosporioides*, agente de controle biológico de *Orthezia praelonga* (Homoptera: Ortheziidae). *Laranja*, v. 19, n. 2, p. 261-268, 1998.

CESNIK, R.; FERRAZ, J. M. G. *Orthezia praelonga* Douglas, 1891 (Hemiptera, Ortheziidae): **biologia, controle químico e biológico**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 27 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa, 9).

CHAGAS, M. C. C.; PARRA, J. R. P.; MILANO, P.; YAMAMOTO, P. T.; GRAVENA, S.; PAIVA, P. E. B.; SÁ, L. A. N. de. Introduction of *Ageniaspis citricola* (Hymenoptera: Encyrtidae) in Brazil: rearing techniques and its release in the State of São Paulo, Brazil. In: INTERNATIONAL ENTOMOPHAGOUS INSECTS WORKSHOP, 12., 1999, Pacific Grove, USA. Abstracts... Pacific Grove: [s. n.], 1999.

CMY, J. R.; DOWELL, R. V. 1989. Exotic fruit flies pests and California Agriculture. *Cal\$ Agricult*, v. 43, n. 3, p. 39-40

COCHONILHA-ROSADA. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. Disponível em: <http://www.cnpma.embrapa.br/projetos/cocho/index.html>. Acesso em: 28 jul. 2021.

COELHO, R. S. Atividade comportamental e eficiência de parasitismo de *Fopius arisanus* e *Diachasmimorpha longicaudata* (Hymenoptera: Braconidae) sobre *Ceratitis capitata* (Diptera: Tephritidae) em diferentes frutíferas. 2017. 72 f. Dissertação (Mestrado em Horticultura Irrigada) - Universidade do Estado da Bahia (UNEB).

COSTA, M. L.; SANTOS, J. O.; ARAÚJO, G. A.; MACEDO, A.; PACHECO, M. G.; PARANHOS, B. Densidade de hospedeiros para a criação de *Fopius arisanus* (Hymenoptera: Braconidae). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 26.; CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE ENTOMOLOGIA, 9., 2016, Maceió. Anais... Brasília, DF: Embrapa, 2016.

COSTA, V. A.; DE NARDO, E. A. B. (coord.). **Curadoria de coleções de himenópteros parasitoides: manual técnico**. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1998. 76 p. (EMBRAPA-CNPMA. Documentos, 16).

COSTA, V. A.; SÁ, L. A. N. de; LA SALLE, J.; DE NARDO, E. A. B.; ARELLANO, F. L.; FUINI, L. C. Indigenous parasitoids (Hymenoptera: Chalcidoidea) of *Phyllocnistis citrella* (Lepidoptera: Gracillariidae) in Jaguariúna, São Paulo State, Brazil: preliminary results. *Journal of Applied Entomology*, v. 123, n. 4, p. 237-240, 1999.

COUTINOT, D.; BRIANO, J.; PARRA, J. R. P.; SÁ, L. A. N.; CÔNSOLI, F. L. Exchange of natural enemies for biological control: is it a rocky road? - the road in the euro-mediterranean region and the south american common market. *Neotropical Entomology*, v. 42, n. 1, p. 1-14, 2013.

CROCOMO, W. B. (org.) **Manejo integrado de pragas**. Botucatu: Unesp, 1990. 385 p.

CRUZ, I. Manejo integrado de pragas de milho com ênfase para o controle biológico. In: CICLO DE PALESTRAS SOBRE O CONTROLE BIOLÓGICO DE PRAGAS, 4., 1995, Campinas. Anais... Campinas: SEB: Instituto Biológico, 1995. p. 48-92.

DANTZGER, D. D.; SÁ, L. A. N. de; PESSOA, M. C. P. Y.; ALMEIDA, G. R. de. Capacidade de infestação da cochonilha-do-carmim, *Dactylopius ceylonicus*, nas plantas hospedeiras *Opuntia ficus-indica* e *Opuntia monacantha* em condições de laboratório. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 3., 2009, Campinas. Anais... Campinas: ITAL: IAC; Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2009.

DAMASCENO, T. G.; MINGOTI, R.; PESSOA, M. C. P. Y.; MARINHO-PRADO, J. S. Uso da classificação climática de Thornthwaite em estimativa de nicho ecológico de *Bactrocera dorsalis* no Brasil. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 15, 2021. *Anais...* Campinas: Instituto de Zootecnia, 2021. 12 p. Evento *online* (Trabalho N° 21506).

DeBACH, P.; ROSEN, D. *Biological control by natural enemies*. New York: Cambridge University Press, 1991. 440 p.

DE NARDO, E. A. B.; CAPALBO, D. M. F.; GATTAZ, N. C.; SÁ, L. A. N. de; JONSSON, C. M.; FERREIRA, S. Banco de dados sobre análise de risco e impacto ambiental de liberações de agentes de controle biológico. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 4., 1994, Gramado. *Anais: sessão de pôsteres*. Pelotas: EMBRAPA-CPACT, 1994. p. 92 (EMBRAPA-CPACT. Documentos, 5).

DE NARDO, E. A. B.; CAPALBO, D. M. F.; OLIVEIRA, M. C. B.; MORAES, G. J. de (ed.). *Análise de risco e avaliação do impacto ambiental decorrente do uso de agentes de controle biológico: memória do workshop*. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1995a. 127 p.

DE NARDO, E. A. B. de; GREWAL, P. S. Impact of inundative application of entomopathogenic nematodes on non-target nematode communities in turfgrass ecosystem. In: SOCIETY OF NEMATOLOGISTS ANNUAL MEETING, 39., 2000, Quebec. *Program and abstracts...* Quebec: Laval University, 2000. p. 65.

DE NARDO, E. A. B.; HOPPER, K.F.; WILLIAMS, R.M. Southern South American procedures for risk assessment of biocontrol introductions and a protocol for predicting parasitoid host range after introduction. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF ENTOMOLOGY, 2000, Foz do Iguassu, PR. *Abstract book...* Londrina: Embrapa Soja, 2000. p. 988.

DE NARDO, E. A. B.; MORAES, G. J. de; CAPALBO, D. M. F.; SÁ, L. A. N. de; CASTRO, V. L. S. S. de; JONSSON, C. M.; CESNIK, R.; GATTAZ, N. C.; WATANABE, M. A. Análise de risco e impacto ambiental do uso de agentes de controle biológico de pragas. In: ENCONTRO ANUAL DA SEÇÃO BRASILEIRA DA INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR IMPACT ASSESSMENT – IAIA, 4., 1995, Belo Horizonte, MG. *Anais...* Belo Horizonte: Cultura, 1995b. p. 365-368.

DE NARDO, E. A. B.; MORAES, G. J. de; SÁ, L. A. N. de. Regulamentação do uso de agentes microbianos de controle. In: ALVES, S. B. (ed.). *Controle microbiano de insetos*. 2.ed. rev. atual. Piracicaba: FEALQ, 1998. cap. 39, p. 1119-1142.

DE NARDO, E. A. B.; SÁ, L. A. N. de; CAPALBO, D. M. F.; MORAES, G. J. de; OLIVEIRA, M. C. B.; CASTRO, V. L. S. S.; WATANABE, M. A. *Protocolo avaliação de agentes microbianos de controle de pragas para registro como biopesticidas: IV. testes toxicopatológicos em aves, artrópodos benéficos, organismos de solo e plantas*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 1999a. 67 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 12).

DE NARDO, E. A. B.; TAMBASCO, F. J. O Brasil se prepara para combater a praga quarentenária Cochonilha- Rosada *Maconellicoccus hirsutus* (Green) (Hemiptera: Pseudococcidae). *Informativo da Sociedade Entomológica do Brasil*, v. 23, n. 2, p. 5, 1998.

DE NARDO, E. A. B.; TAVARES, M. T.; SÁ, L. A. N. de; TAMBASCO, F. J. *Perspectivas do controle biológico da praga quarentenária cochonilha-rosada no Brasil Maconellicoccus hirsutus* (Green) (Hemiptera: Pseudococcidae). Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 1999b. 38 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 2).

DORNELES JUNIOR, J.; APOLINÁRIO, M. L.; ZANOTTA, S.; DOLCEMASCOLLO, T. P.; PEREIRA, L. S.; SALAS, F. J. S.; MARINHO-PRADO, J. S.; PRADO, S. de S. Avaliação da influência de inibidores de protease sintéticos na presença do endossimbionte *Candidatus Carsonella ruddi* em *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae). *Summa Phytopathologica*, v. 43, Feb. 2017. Supplement. Ref. 172. p. 1-6. Anais do Congresso Paulista de Fitopatologia, 40., 2017, Campinas.

EMBRAPA. **Moscas-das-frutas - ameaça à fruticultura nacional.** 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=KrqfosDbEqM>. Acesso: 21 jul. 2021.

EMBRAPA MEIO AMBIENTE. **Monitoramento da qualidade das águas para o desenvolvimento do semi-árido brasileiro – Ecoágua.** Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1999a. Projeto 11.1999.240. Disponível em: [https://www.cnpma.embrapa.br/projetos/prod\\_int/pimangauva.html](https://www.cnpma.embrapa.br/projetos/prod_int/pimangauva.html). Acesso em: 01 ago. 2022.

EMBRAPA MEIO AMBIENTE. **Qualidade ambiental em fruticultura irrigada no nordeste brasileiro – Ecofrutas.** Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1999b (Projeto 11.1999.239). Disponível em: [https://www.cnpma.embrapa.br/projetos/prod\\_int/pimangauva.html](https://www.cnpma.embrapa.br/projetos/prod_int/pimangauva.html). Acesso em: 1 ago. 2022.

EMBRAPA MEIO AMBIENTE. **Métodos de detecção e de acompanhamento in loco dos resíduos de agrotóxicos nas frutas de manga e uva para exportação no semi-árido brasileiro – EcoFIN.** Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1999c (Projeto 11.1999.222). Disponível em: [https://www.cnpma.embrapa.br/projetos/prod\\_int/pimangauva.html](https://www.cnpma.embrapa.br/projetos/prod_int/pimangauva.html). Acesso em: 1 ago. 2022.

FAO. **Code of conduct for the import and release of exotic biological control agents.** Rome, 1996. 12 p.

FAO. **Development of a framework for good agricultural practices.** Rome, 2003. COAG/2003/6. Disponível em: <https://www.fao.org/3/y8704e/y8704e.htm>. Acesso em: 21 jul. 2021.

FAO. ICPM. **Report of the 7<sup>th</sup> session on the activities of the Convention of Biological Diversity:** agenda Item 6.2 of the Provisional Agenda Interim Commission on Phytosanitary Measures. Rome, 2005a. (SCBD/BS/RH/46209R).

FAO. IPPC Secretariat. **International Plant Protection Convention:** new revised text. Approved by the FAO Conference at its 29th Session, November 1997. Disponível em: <http://www.ippc.int>. Acesso em: 25 de nov. 2005.

FAO. Secretariat of the International Plant Protection Convention. **Glossary of phytosanitary terms.** Rome, 2006. 23 p. (ISPM, n. 5).

FAO. Secretariat of the International Plant Protection Convention. **Guidelines for the export, shipment, import and release of biological control agents and other beneficial organisms.** Rome, 2005b. 32 p. (ISPM, n. 3).

FERRARI, L. D.; MORIYA, L. M.; LIMA, E. F. F.; LUIZ, A. J. B.; MARINHO-PRADO, J. S. Incidência de tripses em plantas de duas cultivares de macadâmia. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 15., 2021, Campinas. *Anais...* Campinas: Instituto de Zootecnia, 2021. RE21412. p. 1-10.

FERREIRA FILHO, P. J.; WILCKEN, C. F.; LIMA, A. C. V.; SÁ, L. A. N. de; CARMO, J. B.; ZANUNCIO, J. C. Biological control of *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Aphalaridae) in Eucalyptus plantations. *Phytoparasitica*, v. 43, n. 2, p. 151-157, 2015.

FIDELIS, E. G.; BARBOSA, FRANCISCO F. L.; SILVA, M. L. da; PESSOA, M. C.P. Y.; RASKI, K. R.; MECHEREFF FILHO, M.; HIROSE, E.; SANCHES, M. M.; MELLO, A. F. S.; XAUD, M. R.; SÁ, L. A. N. de. Análise de resultado para estabelecimento e dispersão In: FIDELIS, E. G.; LOHMANN, T. R.; SILVA, M. L. da; PARIZZI, P.; BARBOSA, F. F. L. (Ed.). **Priorização de pragas quarentenárias ausentes no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa, 2018a. 510 p. il. p. 73-94.

FIDELIS, E. G.; LOHMANN, T. R.; SILVA, M. L. da; PARIZZI, P.; BARBOSA, F. F. L. (ed.). **Priorização de pragas quarentenárias ausentes no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa, 2018b. 510 p. il. p. 73-94.

FIGUEIREDO, M. L. C.; CRUZ, I.; DELLA LUCIA, T. M. C. Controle integrado de *Spodoptera frugiperda* (Smith & Abbott) utilizando-se o parasitoide *Telenomus remus* Nixon. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 11, p.1975-1982, 1999.

FIRMINO, D. C.; WILCKEN, C. F.; LEITÃO-LIMA, P. da. S.; SÁ, L. A. N. de. Biologia do psilídeo de concha *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera; Psyllidae) em diferentes espécies de eucalipto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 20, 2004, Gramado, RS, **Resumos...** Gramado: Sociedade Entomológica do Brasil, 2004, p. 458.

FLORES, M. X.; SÁ, L. A. N. de; MORAES, G. J. de. Controle biológico: importância econômica e social. **A Lavoura**, p. 6-9, set./out. 1992. Encarte especial: Manual de controle biológico.

FRANÇA, A. C. G. de; SATO, A. C.; SÁ, L. A. N. de. Criação em laboratório do inseto-praga de pomares cítricos do Estado de São Paulo *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12., 2018, Campinas. **Anais...** Campinas: Instituto Agronômico, 2018. Nº 18401. p. 1-11.

FUJINAWA, M. F.; PONTES, N. C.; BOREL, F. C. ; HALFELD-VIEIRA, B. A. ; GOES, A. ; MORANDI, M. A. B. Biological control of gray mold and Myrothecium leaf spot in begonias. **Crop Protection**, v. 133, article 105138, 2020.

FUJINAWA, M. F. ; PONTES, N. C. ; VALE, H. M. M. ; SANTOS, N. F. ; HALFELD-VIEIRA, B. A. First report of *Myrothecium roridum* causing Myrothecium leaf spot on begonia in Brazil. **Plant Disease**, v. 100, n. 3, p. 655, 2016.

GALLO, D. A introdução de *Lixophaga diatraea* em nosso meio. **Revista de Agricultura**, v. 26, p. 117-126, 1951.

GALLO, D. Contribuição para o controle biológico da broca da cana-de-açúcar. **Anais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, v. 9, p. 135-142, 1952.

GARCIA, F. R. M.; CARABAGIALLE, M. C.; SÁ, L. A. N. de; CAMPOS, J. V. Parasitismo natural de *Phyllocnistis citrella* Stainton, 1856 (Lepidoptera, Gracillariidae, Phyllocnistinae) no oeste de Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 45, n. 2, p. 139-143, 2001.

GASSEN, D. N.; TAMBASCO, F. J. Controle biológico dos pulgões do trigo no Brasil. **Informe Agropecuário**, v. 19, n. 104, p. 49-51, 1983. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/139374/1/ID43560-1983InformeAgropecuariov9n104p49.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2021.

GAZZONI, D. L. **Manejo de pragas da soja: uma abordagem histórica**. Londrina: Embrapa-CNPSo, 1994. 72 p. (EMBRAPA-CNPSo. Documentos, 78).

- GIRALDI, B.; PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de; HALFELD-VIEIRA, B. de A.; MARINHO-PRADO, J. S. Banco de dados de pragas de flores e plantas ornamentais: apoio à análise de risco de pragas quarentenárias no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 12., 2011, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Sociedade Entomológica do Brasil, 2011a. PT.02.56.
- GIRALDI, B.; PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de; HALFELD-VIEIRA, B. de A.; MARINHO-PRADO, J. S. Banco de dados de pragas quarentenárias Ar: apoio ao sistema de análise de risco de introdução e estabelecimento de pragas quarentenárias do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 5., 2011, Campinas. *Anais...* Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2011b. 1 CD ROM. N. 11414. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/54230/1/2011AA29.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2021.
- GIRALDI, B.; SÁ, L. A. N. de; PESSOA, M. C. P. Y. Sistema informatizado de gerenciamento dos processos de introdução de pragas quarentenárias e de bioagentes exóticos de controle - Gerprocquarentena. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6., 2012, Jaguariúna. *Anais...* Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2012. 1 CD ROM. Nº 12414.
- GIRARDI, E. A.; MILORI, D. M. B. P.; MARINHO-PRADO, J. S.; NAVA, D. E.; SANTOS, I. R. I.; STUCHI, E. S.; ASTUA, J. de F.; GURGEL, F. de L.; SÁ, L. A. N. de; SANCHES, M. M.; ANDRADE, E. C. de; BARBOSA, F. F. L. Relatório Corporativo da I Reunião Técnica do Arranjo HLB dos Citros “Soluções inovadoras e integradas para a superação da doença *huanglongbing* (HLB, ex-greening) dos citros”. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2017. (Embrapa Mandioca e Fruticultura. Documentos, 218).
- GONDIM JÚNIOR, M. G.; MORAES, G. J. de; OLIVEIRA, J. V.; BARROS, R.; PEREIRA, J. L. L. Biologia de *Neoseiulus anonyms* (Acari: Phytoseiidae). *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil*, v. 25, n. 3, p. 451-455, 1996.
- GOMES, E. S.; SANTOS, V.; ÁVILA, C. J. Biology and fertility life table of *Helicoverpa armigera* (Lepdoptera; Noctuidae) in different host. *Entomological Science*, v. 20, n. 1, p. 419-426, 2017.
- GOMES, J. Histórico do combate biológico no Brasil. *Boletim do Instituto de Ecologia e Experimentação Agrícola*, n. 21, p. 89-97, 1962.
- GRAVENA, S. Manejo ecológico de pragas no pomar cítrico. *Revista Laranja*, v. 2, n. 11, p. 205-225, 1990.
- GROTH, M. Z.; NORBERG, D. S.; BERNARDI, D.; LOECK, A. E.; PONCIO, S.; NAVA, D. E. Parasitismo de *Fopius arisanus* em ovos de *Ceratitis capitata* em diferentes idades. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE DEFENSIVOS AGRÍCOLAS NATURAIS, 7., 2015, Pelotas. *Anais...* Pelotas: Embrapa Clima Temperado, Brasília, DF: Embrapa, 2015. 1 CD-ROM.
- GUAGLIUMI, P. As cigarrinhas dos canaviais no Brasil: perspectivas de uma luta biológica nos estados de Pernambuco e Alagoas. *Brasil Açucareiro*, v. 72, p. 34-43, 1968.
- HABIB, M. E. M.; ANDRADE, C. F. S. Bactérias entomopatogênicas. In: ALVES, S. B. (ed.). *Controle Microbiano de Insetos*. Piracicaba: FEALQ, 1998, p. 383-446.
- HAJI, F. N. P.; VALASQUEZ, J. J.; BLEICHER, E.; GARCIA ROA, F.; SILVA, C. N.; SOUZA JÚNIOR, M. M. Produção massal de *Trichogramma* spp. no submédio São Francisco. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 3., 1992, Águas de Lindóia. *Anais...* Jaguariúna: EMBRAPA-CNPDA, 1992. p. 159.

HALFELD-VIEIRA, B. A.; ZILLI, J. E.; NECHET, K. de L.; PEREIRA, G. M. D.; SOUZA, G. R. First record of *Ceratocystis fimbriata* on *Carapa guianensis*. **New Disease Reports**, v. 26, p. 13, 2012.

HALFELD-VIEIRA, B. A.; TERAPO, D.; NECHET, K. de L. First report of *Geotrichum candidum* causing sour-rot of melon in Brazil. **Plant disease**, v. 104, n. 5, p. 1537, 2020.

HOLLER, W. A.; MINGOTI, R.; PESSOA, M. C. P. Y.; BRASCO, M. A.; SÁ, L. A. N. de; FARIAS, A. R.; SPADOTTO, C. A.; LOVISI FILHO, E.; MARINHO-PRADO, J. S. **Caracterização dos limites territoriais brasileiros para prevenção de entrada de *Prodioplosis longifila* (Gagne) (Diptera: Cecidomyiidae)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 26.; CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE ENTOMOLOGIA, 9., 2016, Maceió. Anais... Maceió: Sociedade Entomológica do Brasil; Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2016a. p. 486.

HOLLER, W. A.; MINGOTI, R.; SPADOTTO, C. A.; PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de **Elementos de apoio à defesa fitossanitária para potencial entrada de *Chilo partellus* Swinhoe (Lepidoptera: Pyralidae), praga quarentenária ausente, no Brasil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FITOSSANIDADE, 3., 2015, Águas de Lindóia. Novos rumos da fitossanidade no Brasil: anais. Águas de Lindóia: Unesp, 2015a. Ref. 109. p. 452-455.

HOLLER, W. A.; PESSOA, M. C. P. Y.; FARIAS, A. R.; SÁ, L. A. N. de; MINGOTI, R.; LOVISI FILHO, E.; SPADOTTO, C. A. **Identificação de regiões brasileiras suscetíveis ao ingresso e estabelecimento de *Chilo partellus* (Swinhoe) (Lepidoptera: Pyralidae) - praga quarentenária ausente**. Campinas: Embrapa Gestão Territorial, 2015b. 2 p. (Nota Técnica, 7).

HOLLER, W. A.; PESSOA, M. C. P. Y.; MINGOTI, R.; SÁ, L. A. N. de; LOVISI FILHO, E.; FARIAS, A. R.; SPADOTTO, C. A.; MARINHO-PRADO, J. S. **Detalhamento de regiões brasileiras suscetíveis ao ingresso e estabelecimento da praga quarentenária ausente (A1) - *Chilo partellus* (Swinhoe) (Lepidoptera: Pyralidae)**. Campinas: Embrapa Gestão Territorial, 2016b. 12 p. (Embrapa Gestão Territorial. Comunicado Técnico, 4).

HOLLER, W. A.; PESSOA, M. C. P. Y.; MINGOTI, R.; SÁ, L. A. N. de; LOVISI FILHO, E.; SPADOTTO, C. A.; FARIAS, A. R. **Áreas da região norte brasileira mais suscetíveis ao ingresso e estabelecimento de *Chilo partellus* (Swinhoe) (Lepidoptera: Pyralidae)**. Campinas: Embrapa Gestão Territorial, 2015c. 2 p. (Nota Técnica, 8).

HORTIFRUTI BRASIL. Piracicaba, ano 19, n. 207, dez. 2020-jun. 2021. Edição especial. Disponível em: <https://www.hfbrasil.org.br/br/revista/acessar/completo/retrospectiva-2020-perspectivas-2021.aspx>. Acesso em: 30 jul. 2021.

HOUNTONDJI, F. C. C.; DE NARDO, E. A. B.; TAMAI, M. A. Não suscetibilidade de abelhas a infecção pelo fungo *Neozygites* sp., agente de controle do ácaro verde da mandioca. In: CONGRESSO DE ENTOMOLOGIA, 15., 1995, Caxambu. Anais... Piracicaba: SEB, 1995. p. 610.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Ibá 2020**. Brasília, DF: Instituto Brasileiro de Árvores/ Instituto Brasileiro de Economia (IBRE)-Fundação Getúlio Vargas (FGV), 2020. 66 p.

JACOMO, B. de O.; MINGOTI, R.; PESSOA, M. C. P. Y.; MARINHO-PRADO, J. S. Avaliação do efeito do Threshold do Maxent em estimativas de áreas climáticas aptas a dois insetos-pragas exóticos. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 14., 2020, Campinas. Anais... Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2020. RE20502. 2 p.

- JACOMO, B. de O.; MINGOTI, R.; PESSOA, M. C. P. Y.; MARINHO-PRADO, J. S. Estimativa de nicho ecológico de *Anastrepha curvicauda* em território brasileiro por algoritmos de modelagem. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 15., 2021, Campinas. **Anais...** Campinas: Instituto de Zootecnia, 2021. 12 p.
- KODAIRA, J. Y.; PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de; WILCKEN, C. F.; ALMEIDA, G. R. de. Identificação de períodos propícios ao parasitismo de ninfas do Psilídeo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* por *Psyllaephagus bliteus* em condições de laboratório: estudo de caso por simulação de sistemas. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2007, Campinas. **Anais...** Campinas: ITAL, 2007. 6 p.
- KOMATSU, S. S.; NAKANO, O. Estudo visando o manejo do ácaro da leprose em citros através do ácaro predador *Euseius concordis*. **Revista Laranja**, v. 9, n. 1, p. 125-146, 1988.
- LARANJEIRA, F. F.; ALEXANDRE, J. R.; MORAIS, E. F.; LOHMANN, T. R.; SILVA, M. L. da. **Priorização de pragas quarentenárias ausentes: metodologia e lista das 20 pragas mais importantes**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2017. 24 p. il. (Embrapa Mandioca e Fruticultura. Documentos, 220).
- LAZARIN, D.F.; PESSOA, M.C.P.Y.; SÁ, L.A.N.; MARINHO-PRADO, J.S. Avaliação preliminar por simulação numérica da influência de variedades de eucalipto na dinâmica populacional do percevejo bronzeado visando biocontrole. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 12., 2011, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Sociedade Entomológica do Brasil, 2011a. P.T.02.63.
- LAZARIN, D. F.; PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N.; MARINHO-PRADO, J. S. Avaliações preliminares da dinâmica populacional do percevejo bronzeado em *Eucalyptus camaldulensis* em condições de criação laboratorial: estudo por simulação numérica. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 5., 2011, Campinas. **Anais...** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2011b. 1 CD ROM. 8 p. (Nº 11415).
- LAZARIN, D. F.; VIDAL, S. B.; SA, L. A. N. de; PESSOA, M. C. P. Y. Controle informatizado do monitoramento de pragas de *Eucalyptus* spp. por cartão amarelo em hortos florestais. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6., 2012, Jaguariúna. **Anais...** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2012. 1 CD ROM. Nº 12404.
- LEMES, J. J. da S.; PRADO, J. S. M.; SOUZA, R. R. de; DIAS, B. C. P. Inibidor de proteases (berenil) afetando biologia e comportamento de lagartas de *Helicoverpa armigera*. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 9., 2015, Campinas. **Anais...** Campinas: IAC, 2015. 8 p. (Nº 15405).
- LENTEREN, J. C. Controle de qualidade de agentes de controle biológico produzidos massalmente. In: BUENO, V. H. P. **Controle biológico de pragas: produção massal e controle de qualidade**. Lavras: UFLA, 2009. p. 311-337.
- LENTEREN, J. C.; COCK, M. J. W.; BRODEUR, J.; BARRATT, B. I. P.; BIGLER, F.; BOLCKMANS, K.; HAAS, F.; MASON, P. G.; PARRA, J. R. P. Will the Convention on Biological Diversity put an end to biological control. **Revista Brasileira de Entomologia**, v. 55, n. 1, p. 1-5, 2011.
- LEVANTAMENTO da incidência das doenças de citros: greening, CVC e cancro cítrico. Araraquara: Fundecitrus, 2020. 67 p.

LIMA, M. S.; SILVA, D.; FALCÃO, H.; FERREIRA, W.; SILVA, L. PARANHOS, B. A. G. Predadores associados a *Dactylopius opuntiae* (Hemiptera: Dactylopiidae) em palma forrageira no estado de Pernambuco, Brasil. *Revista Chilena de Entomologia*, v. 36, p. 51-54, 2011.

LUCCHINI, F.; SÁ, L. A. N. de; TAMBASCO, F. J.; FONTES, E. M. G. **Proposta de normas de funcionamento do laboratório de quarentena para introdução de agentes de controle biológico de pragas e plantas invasoras e sugestões para atualização de legislação nacional referente ao intercâmbio interregional e internacional de inimigos naturais.** Jaguariúna: EMBRAPA-CNPDA, 1989. 14 p.

LUCHINI, G. A.; MARINHO-PRADO, J. S.; PESSOA, M. C. P. Y. Simulação do desenvolvimento de *Helicoverpa armigera* em soja, milho e dieta artificial. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12., 2018, Campinas. *Anais...* Campinas: Instituto Agronômico, 2018. N° 18404. p. 1-14.

LUCHINI, G. A.; TEIXEIRA, W. P.; SOUZA, G. M.; PESSOA, M. C. P. Y.; MARINHO-PRADO, J. S. Avaliação de parâmetros biológicos de *Helicoverpa armigera* em plantas de feijão cultivar pérola. In: CONGRESSO ABERTO AOS ESTUDANTES DE BIOLOGIA - CAEB, 13., 2017, Campinas. *Caderno de resumos...* Campinas: Unicamp-IB, 2017a. p. 163.

LUCHINI, G. A.; TEIXEIRA, W. P.; SOUZA, G. M.; PESSOA, M. C. P. Y.; MARINHO-PRADO, J. S. Avaliação prévia da relação entre coloração de *Diaphorina citri* e o hospedeiro do inseto em condição controlada de laboratório. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 11., 2017, Campinas. *Anais...* Campinas: Instituto Agronômico, 2017b. N° 17417. 12 p.

MAFRA, D. E. da S.; SÁ, L. A. N. de; PESSOA, M. C. P. Y.; SARTORI, C. A.; MOREIRA, G. G. Avaliação da ocorrência de pragas exóticas de *Eucalyptus* sp, *Glycaspis brimblecombei* e *Thaumastocoris peregrinus*, e do bioagente exótico *Psyllaephagus bliteus* em três regiões de São Paulo no ano de 2013. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 9., 2015, Campinas. *Anais...* Campinas: IAC, 2015. 8 p.

MALDIVAS. Ministry of Environment and Energy. **National Biodiversity Strategy and Action Plan (NBSAP) 2016- 2025.** Maafannu, 2015, 102 p. Disponível em: <http://www.environment.gov.mv/biodiversity/wp-content/uploads/2016/01/NBSAP-Maldives-2016-2025.pdf>. Acesso em: 5 maio 2017.

MARINHO-PRADO, J. S.; MORAIS, L. A. S. de; PAZIANOTTO, R. A. A. **Efeito deletério de óleos essenciais sobre *Anticarsia gemmatalis* e *Helicoverpa armigera*.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2019. 25 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 87).

MARINHO-PRADO, J. S.; QUEIROZ, S. C. do N. de; PRADO, S. de S.; ASSIS, M. C. de. **Bioatividade de extratos de plantas sobre lagartas de *Anticarsia gemmatalis* e *Helicoverpa armigera*.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2018. 22 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 78).

MARINHO-PRADO, J. S.; PALOMO, Y. I. F. A.; GARCIA, P. T. M.; VENÂNCIO, L.; SA, L. A. N. de. Inhibitor of cysteine protease and mortality of *Diaphorina citri*. In: INTERNATIONAL CITRUS CONGRESS, 13., 2016, Foz do Iguaçu. **Sustainable citriculture: the role of applied knowledge:** abstract book. Campinas: IAC; Londrina: IAPAR, 2016. p. 69. Resumo S4-263.

MARQUES, C. E. M.; LIMA, M. S.; MELO, J. W. S.; BARROS, R.; PARANHOS, B. A. J. Evaluation of *Ferrisia dasyllirii* (Cockerell) (Hemiptera: Pseudococcidae) and non-prey foods on the development, reproduction, and survival of *Cryptolaemus montrouzieri* Mulsant (Coleoptera: Coccinellidae). **The Coleopterists Bulletin**, v. 69, n. 2, p. 343-348, 2015.

MARSARO JÚNIOR, A. L.; TRASSATO, L. C.; PEREIRA, P. R. V. da S.; SÁ, L. A. N. de. **Monitoramento para a detecção da cochonilha-rosada, praga quarentenária, presente na República Cooperativista da Guiana.** Boa Vista: Embrapa Roraima, 2007. (Embrapa Roraima. Comunicado Técnico, 10).

MARSARO JÚNIOR, A.L.; PEREIRA, P.R.V.S.; SÁ, L. A. N. de; COSTA, V. A.; PAIVA, W. R. S. C. **parasitoides nativos que realizam o controle biológico da larva-minadora-dos-citros no estado de Roraima.** Boa Vista: Embrapa Roraima, 2006. 2 p. (Embrapa Roraima. Comunicado Técnico, 11).

MAZUCHI, T.; PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de. Desenvolvimento de banco de dados bioecológicos para apoio à análise de risco de introdução de pragas quarentenárias dos cultivos de citros, eucalipto e cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 4., 2010, Campinas. **Anais...** Campinas: IAC: ITAL: APTA: Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2010. 1 CD-ROM. 6 p.

MEIRELLES, R. N.; REDAELLI, L. R.; JAHNKE, S. M.; OURIQUE, C. B.; OZORIO, D. V. B. Parasitism of fruit flies (tephritidae) in field, after the releases of *Diachasmimorpha longicaudata* (Ashmead) (Hymenoptera: Braconidae) in Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 38, n. 2, e-673, 2016.

MELO, M. P. de; CABRAL, C. S.; REIS, A.; MATOS, K. S.; MARTINS, P. P.; BESERRA JÚNIOR, J. E. A.; NECHET, K. de L.; HALFELD-VIEIRA, B. de A. *Rhizoctonia solani* AG 1-IB and AG 4 HG-I causing leaf blight and root rot in plants from the *Lamiaceae* family in Brazil. **Tropical Plant Pathology**, v. 43, n. 2, p. 152-159, Apr. 2018a.

MELO, M. P. de; MATOS, K. S.; MOREIRA, S. I.; SILVA, F. F.; CONCEIÇÃO, G. H.; NECHET, K. de L.; HALFELD-VIEIRA, B. de A.; BESERRA JUNIOR, J. E. A.; VENTURA, J. A.; COSTA, H.; FURTADO, E. L.; ALVES, E.; CERESINI, P. C. Two new *Ceratobasidium* species causing white thread blight on tropical plants in Brazil. **Tropical Plant Pathology**, v. 43, n. 6, p. 559-571, 2018b.

MINGOTI, R.; PESSOA, M. C. P. Y.; MORIYA, L. M.; PIVA, P. L. B. de T.; MARINHO-PRADO, J. S.; DIOGO, M. de S. Zoneamento territorial de áreas brasileiras aptas à *Amblyopelta nitida* (Stal) (Hemiptera: Coreidae). In: MOURA, P. H. A.; MONTEIRO, V. de F. C. (org.). **Pesquisa e desenvolvimento agropecuário no Brasil.** Ponta Grossa, PR: Atena, 2023a. cap. 5. p. 46-57.

MINGOTI, R.; PESSOA, M. C. P. Y.; MORIYA, L. M.; PIVA, P. L. B. de T. Zoneamento de áreas brasileiras favoráveis à *Scirtothrips dorsalis* (Thysanoptera: Thripidae). In: SILVA-MATOS, R. R. S. DA; LINHARES, S. C.; LOPES, J. M. (org.). **Ciências agrárias: Debates emblemáticos e situação perene.** Ponta Grossa, PR: Atena, 2023b. cap. 3. p. 24-43.

MINGOTI, R.; PESSOA, M. C. P. Y.; MORIYA, L. M.; PIVA, P. L. B. de T. Zoneamento de áreas brasileiras favoráveis à *Cryptophlebia ombrodelta*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 20., 2023, Florianópolis. **Anais [...].** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2023c. Ref. 155354. p. 97-100.

MINGOTI, R.; HOLLER, W. A.; LOVISI FILHO, E.; PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de; SPADOTTO, C. A.; FARIAS, A. R.; MARINHO-PRADO, J. S. **Identificação dos locais mais vulneráveis à entrada de *Prodioplosis longifila* (Diptera: Cecidomyiidae) no Brasil.** Campinas: Embrapa Gestão Territorial, 2017. 29 p. (Embrapa Gestão Territorial. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 6).

MINGOTI, R.; PESSOA, M. C. P. Y.; MARINHO-PRADO, J. S.; SIQUEIRA, C. A.; JACOMO, B. de O.; RAMOS, G. G.; DAMACENO, T. G. Áreas com favorabilidade mensal à ocorrência de *Drosófila* da

Asa Manchada no Brasil. In: RIBEIRO, J. C. (org.). **A face transdisciplinar das ciências agrárias**. Ponta Grossa: Atena, 2021a. p. 204-218. cap. 21.

MINGOTI, R.; PESSOA, M. C. P. Y.; MARINHO-PRADO, J. S.; SIQUEIRA, C. A.; RAMOS, G. G.; JACOMO, B. de O. **Zoneamentos mensais de áreas favoráveis a *Aleurocanthus woglumi* no Brasil**. In: MOURA, P. H. A. (org.). **Responsabilidade social, produção e meio ambiente nas ciências agrárias 2**. Ponta Grossa: Atena, 2021b. p. 114-127. cap. 11.

MINGOTI, R.; PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de; MARINHO-PRADO, J. S.; SIQUEIRA, C. A.; MUNHOZ, V. C.; BERALDO, G. N.; FARIAS, A. R. **Acompanhamento georreferenciado de áreas brasileiras de Cerrado sujeitas aos ataques de *Helicoverpa armigera***. In: PRANDEL, J. A. (org.). **Processamento, análise e disponibilização de informação geográfica**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2019. cap. 11. p. 117-130.

MOMESSO, C. M.; PESSOA, M. C. P. Y.; CALDERARI, N. P.; NEVES, M. F. de O.; SÁ, L. A. N. de. **Condições para maior porcentagem de brotamento de *Citrus limonia* em vaso e de disponibilidade de *Diaphorina citri* para criação de *Diaphorencyrtus aligarhensis* em laboratório**. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 10., 2016, Campinas. **Anais...** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2016. RE N° 16401. 13 p.

MORAES, G. J. de; CANHOS, D.; SÁ, L. A. N. de; GATTAZ, N. C. **Sistema internacional de informação sobre controle biológico**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE INFORMATIZAÇÃO DA AGROPECUÁRIA, 1995. Juiz de Fora. **Resumos...** [S. l.: s. n.], 1995. 4 p.

MORAES, G. J. de; CASTRO, T. M. M. G.; KREITER, S.; QUILICI, S.; GONDIM JÚNIOR, M. G. C.; SÁ, L. A. N. de. **Search for natural enemies of *Raoiella indica* Hirst in Réunion Island (Indian Ocean)**. 2012. **Acarologia**, v. 52, n. 2, p. 129-134, 2012.

MORAES, G. J. de; FLECHTMANN, C. H. W. **Manual de Acarologia: acarologia básica e ácaros de plantas cultivadas no Brasil**. Ribeirão Preto: Holos, 2008. 288 p.

MORAES, G. J. de; ALENCAR, J. A.; LIMA, J. L. S.; YANINEK, J. S.; DELALIBERA JÚNIOR, I. **Alternative plant habitats for common *Phytoseiidae* predators of the cassava green mite (Acari: Phytoseiidae: Tetranychidae) in Northeast Brazil**. **Experimental and Applied Acarology**, v. 17, n. 1, p. 77-90, 1993.

MORAES, G. J. de; SÁ, L. A. N. de; TAMBASCO, F. J. **International exchange of microorganisms for biological control of pest species: a research point of view**. In: MARTINS, M. T.; SAITO, M. I. Z.; TIEDJE, J. M.; HAGLER, L. C. N.; DÖBEREINER, J.; SANCHEZ, P. S. (ed.). **Progress in microbial ecology**. São Paulo: SBM: ICOME, 1997. p. 413-418.

MORAES, G. J. de; SÁ, L. A. N. de; TAMBASCO, F. J. **Legislação brasileira sobre o intercâmbio de agentes de controle biológico**. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1996. 16 p. (EMBRAPA-CNPMA. Documentos, 3).

MORAES, G. J. de; TAMBASCO, F. J.; SÁ, L. A. N. de. **O controle biológico clássico e o serviço quarentenário no Brasil**. In: DONADIO, L. C.; GRAVENA, S. (coord.). **Manejo integrado de pragas dos citros**. Campinas: Fundação Cargill, 1994. p. 77-85. Edição dos anais do 3º Seminário Internacional de Citros, Bebedouro, 1994.

MORSOLETO, R. V.; WATANABE, M. A. **Efeito do plantio direto, aplicação de miral e uso de subsolagem na incidência de inimigos naturais em cultura de feijão em Guaíra-SP**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

ENTOMOLOGIA, 16.; ENCONTRO NACIONAL DE FITOSSANITARISTAS, 7., 1997, Salvador. **Resumos...** Salvador: SEB : EMBRAPA-CNPMP, 1997. p. 103.

MOSCAS-DAS-FRUTAS: é tema de manual técnico produzido por pesquisadores do IB. **Instituto Biológico - Notícias Online**, 5 abr. 2021 Disponível em: <http://www.biologico.agricultura.sp.gov.br/noticia/moscas-das-frutas-e-tema-de-manual-tecnico-produzido-por-pesquisadores-do-ib>. Acesso em: 21 mar. 2024

NAKASONE, A. K.; CARDOSO, S. V. D.; COUTINHO, I. B. de L.; NECHET, K. de L.; FERREIRA, S. da C.; BOARI, A. de J.; NASCIMENTO, W. M. O.; CARVALHO, J. E. U. de. Ocorrência de *Lasioidiplodia pseudotheobromae* em bacurizeiro (*Platonia insignis*). **Summa Phytopathologica**, v. 46, n. 1, p. 58-59, 2020.

NAVIA, D. Biologia da invasão. In: SUGAYAMA, R. L.; SILVA, M. L.; SILVA, S. X. B.; RIBEIRO, L. C.; RANGEL, L. E. P. (ed.). **Defesa vegetal: fundamentos, ferramentas, políticas e perspectivas**. Belo Horizonte, MG: Sociedade Brasileira de Defesa Agropecuária, 2015. p. 27-55.

NEVES, M. F. O.; PESSOA, M. C. P. Y.; SA, L. A. N. de; NAVA, D. E.; GIRARDI, E. A. Avaliação do desenvolvimento de *Diaphorina citri* em *Murraya paniculata* e *Citrus limonia* em cenários de simulação numérica para subsidiar criações laboratoriais de *Tamarixia radiata*. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 9., 2015, Campinas. **Anais...** Campinas: IAC, 2015. 8 p.

NORONHA, A. C. da; MORAES, G.; BONATO, O.; NASCIMENTO, S. M. do; MEDEIROS, A. Dinâmica populacional de *Typhlodromalus manihoti* (Moares) (Acari: Phytoseiidae) em mandioca. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 17., 1998, Rio de Janeiro, RJ. **Resumos...** Rio de Janeiro: SEB, 1998. p. 1056.

NORONHA, A. C. da S.; MORAES, G. J. de; CICIOLA, A. I. Biologia de *Amblyseius manihoti* Moraes n. sp. sobre *Mononychellus tanajoa* (Bondar) (Acari: Phytoseiidae: Tetranychidae) em variedades de mandioca. **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 24, n. 2, 1995.

ODOUR, G. I.; YANINEK, J. S.; GEEST, L. P. S. V. D.; MORAES, G. J. de. Germination and viability of capilliconidia of *Neozygites floridana* (Zygomycetes: Entomophthorales) under constant temperature, humidity, and light conditions. **Journal of Invertebrate Pathology**, v. 67, n. 3, p. 267-278. 1996a.

ODOUR, G. I.; MORAES, G. J. de; GEEST, L. P. S. V. D.; YANINEK, J. S. Production and germination of primary conidia of *Neozygites floridana* (Zygomycetes: Entomophthorales) under constant temperature, humidity, and photoperiods. **Journal of Invertebrate Pathology**, v. 68, n. 3, p. 213-222. 1996b.

OLIVEIRA, M. R. V.; NEVILLE, L. E.; VALOIS, A. C. C. **Importância ecológica e econômica e estratégias de manejo de espécies invasoras exóticas**. Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2001. (Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. Circular Técnica, 8).

OLIVEIRA, M. R. V.; PAULA, S. V. **Análise de risco de pragas quarentenárias: conceitos e metodologias**. Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2002, 144 p. (Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. Documentos, 82).

OLIVEIRA, M. R. V.; SÁ, L. A. N. de. Consequências de riscos de introdução e dispersão de material biológico indesejável no país frente às demandas das organizações internacionais e da sociedade mundial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 21, 2006, Recife. **Entomologia: da academia à transferência de tecnologia: resumos**. Recife: SEB, 2006. 1 CD-ROM.

OLIVEIRA, W. P. de; SÁ, L. A. N. de; MAIA, A. H. N.; MONTEIRO, R. T. R. Efeito de sistema de produção na densidade populacional de ácaros (Acari) em citros. *Revista Científica Rural*, v. 13, p. 309-320, 2011.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. O. L.; LOPES, V. G.; PEREIRA, P. R. V. S.; MOREIRA, M. A. B.; SÁ, L. A. N. de. Ocorrência de parasitoides de *Phyllocnistis citrella* Stainton, no Estado de Roraima. Boa Vista: Embrapa Roraima, 2001. 5 p. (Embrapa Roraima. Comunicado Técnico, 8).

ORTÉZIA. Araraquara: Fundecitrus, 2021. Disponível em: <https://www.fundecitrus.com.br/doencas/ortezia>. Acesso em: 24 jul. 2021.

PARANHOS, B. A. J. Protocolo para multiplicação de *Fopius arisanus* (Hymenoptera: Braconidae), visando programas de controle biológico no Brasil. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 15., 2017, Ribeirão Preto. Os novos desafios do controle: anais. São Paulo: FCAV/Unesp: ESALQ, 2017.

PARANHOS, B. A. J.; PONCIO, S.; MORELLI, R.; NAVA, D. E.; SÁ, L. A. N. de; MANOUKIS, N. C. Non-target effects of the exotic generalist parasitoid wasp *Fopius arisanus* (Sonan) estimated via competition assays against *Doryctobracon areolatus* (Szepliget) on both native and exotic fruit fly hosts. *BioControl*, v. 66, n. 1, p. 83-96, 2021.

PARANHOS, B. A. J.; SÁ, L. A. N. de; MANOUKIS, N. C.; PRADO, S. S.; MORELLI, R.; NAVA, D. E.; LIMA, A. L.; JANG, E. Competição interespecífica entre o parasitoide exótico *Fopius arisanus* e o nativo *Doryctobracon areolatus* (Hymenoptera: Braconidae) em *Anastrepha fraterculus* (Diptera: Tephritidae). In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 13., 2013, Bonito. Faça bonito: use controle biológico: anais. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 1 CD ROM.

PARRA, J. R. P. Situação atual e perspectivas do controle biológico, através de liberações inundativas no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 27, s. n., p. 271-279, 1992.

PARRA, J. R. P.; BOTELHO, P. S. M.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; BENTO, J. M. S. (ed.). **Controle biológico no Brasil: parasitoides e predadores**. São Paulo: Manole, 2002a. 635 p.

PARRA, J. R. P.; BOTELHO, P. S. M.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; BENTO, J. M. S. Controle biológico: terminologia. In: PARRA, J. R. P. (ed.) **Controle biológico no Brasil: parasitoides e predadores**, São Paulo: Manole, 2002b. p. 1-16.

PARRA, J. R. P.; PINTO, A. de S. Desafios da produção e comercialização de parasitoides para o controle de pragas no Brasil. In: HALFELD-VIEIRA, B. de A.; MARINHO-PRADO, J. S.; NECHET, K. de L.; MORANDI, M. A. B.; BETTIOL, W. (ed.). **Defensivos agrícolas naturais: uso e perspectivas**. Brasília, DF: Embrapa, 2016. p. 335-358 (Capítulo 14).

PARRA, J. R. P.; SÁ, L. A. N. de. Situação atual e perspectivas do controle biológico, através de liberações inundativas no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 27, p. 271-279, 1992.

PEREIRA, J. C.; JESUS-BARROS, C. R. de; BARIANI, A.; FACUNDES, V. da S.; BRITO, B. D.; LIMA, A. L. Parasitismo de *Fopius arisanus* sobre mosca-da-carambola em laboratório. In: JORNADA CIENTÍFICA DA EMBRAPA AMAPÁ, 1., 2015, Macapá. **Resumos...** Macapá: Embrapa Amapá, 2015. 1 CD ROM.

PESSOA, M. C. P. Y. **Simulação e inteligência artificial aplicadas ao estudo da dinâmica populacional do bicudo do algodoeiro na região de Campinas, SP.** 1994. 208 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PESSOA, M. C. P. Y.; ÁVILA, C. J.; FLUMIGNAN, D. L.; LUCHINI, G. A.; BORGHESI, R. Estimativas de fases imaturas de *Helicoverpa armigera* em Dourados e Ponta Porã em apoio ao biocontrole. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 16., 2019, Londrina. **Anais...** Londrina: SEB: Embrapa, 2019a. p. 454.

PESSOA, M. C. P. Y.; ÁVILA, C. J.; MARINHO-PRADO, J. S.; LUCHINI, G. A.; SOUZA, E. C. S.; RICHETTI, A.; FLUMIGNAN, D. L. Nível de dano de *Helicoverpa armigera* em fase vegetativa de soja (safra 2016/2017) em Ponta Porã. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2019b. 24 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 85)

PESSOA, M. C. P. Y.; CHAIM, A.; CAPALBO, D. M. F.; HAMADA, E.; TAMBASCO, F. J.; FERRAZ, J. M. G.; SKORUPA, L. A.; ASSAD, M. L. L.; SCRAMIN, S. Boas práticas agrícolas e meio ambiente. In: ELEMENTOS de apoio para as boas práticas agrícolas e o sistema APPCC. Brasília, 2004. p. 13-27. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/18225/1/BOASPRATICASAGRICElementosdeapoioparaasBPAeosistemaAPPCC.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2021.

PESSOA, M. C. P. Y.; LUCHINI, G. A.; MARINHO-PRADO, J. S.; MINGOTI, R. Avaliação da dinâmica populacional de *Helicoverpa armigera* por simulação em algodão e trigo. In: PEREIRA, A. I. A. (org.). **Coletânea nacional sobre entomologia 2.** Ponta Grossa: Atena, 2020a. E-book. cap. 1. p. 1-20.

PESSOA, M. C. P. Y.; MARINHO-PRADO, J. S.; MINGOTI, R.; LOVISI FILHO, E.; SILVA, A. de S.; MOURA, M. S. B. de; SILVA FILHO, P. P. da; SÁ, L. A. N. de; PRADO, S. S.; SPADOTTO, C. A.; FARIAS, A. R. Estimativas de potencial adaptação de *Bactrocera carambolae* Drew & Hancock (Praga Quarentenária A2): estudo de caso para dois perímetros irrigados do Vale do Rio São Francisco. Campinas: Embrapa Gestão Territorial, 2016a. 2 p. (Nota Técnica, 9).

PESSOA, M. C. P. Y.; MARINHO-PRADO, J. S.; MINGOTI, R.; PRADO, S. S.; LOVISI FILHO, E.; SÁ, L. A. N. de; SPADOTTO, C. A.; FARIAS, A. R. **Avaliação de potencial desenvolvimento de *Chilo partellus* (Swinhoe) (Lepidoptera: Pyralidae) e de três bioagentes de controle exóticos em condições climáticas da Região Norte do Brasil - Estados do Amapá e Roraima.** Campinas: Embrapa Gestão Territorial, 2016b. 2 p. (Nota Técnica, 10).

PESSOA, M. C. P. Y.; MARINHO-PRADO, J. S.; SÁ, L. A. N. de. Avaliação do desenvolvimento de *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) por exigências térmicas em culturas de soja e feijão no sudoeste do estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 13., 2013, Bonito. **Anais...** Bonito: Embrapa Agropecuária Oeste; Universidade Federal da Grande Dourados, 2013a. 1 CD ROM.

PESSOA, M. C. P. Y.; MARINHO-PRADO, J. S.; SÁ, L. A. N. de. **Avaliação do potencial desenvolvimento de *Helicoverpa armigera* (Hübner, 1808) (Lepidoptera: Noctuidae) em cultivo de soja na região de Barretos - norte do estado de São Paulo.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2014a. 27 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 63).

PESSOA, M. C. P. Y.; MARINHO-PRADO, J. S.; SÁ, L. A. N. de. Desenvolvimento de *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) em tomateiro no sudoeste de São Paulo – avaliação por exigências térmicas. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 13., 2013, Bonito. **Anais...** Bonito: Embrapa Agropecuária Oeste; Universidade Federal da Grande Dourados, 2013b. 1 CD ROM.

PESSOA, M. C. P. Y.; MARINHO-PRADO, J. S.; SÁ, L. A. N. de. Estimativa de gerações de *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) em cultivo de soja no norte do estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 13., 2013, Bonito. **Anais...** Bonito: Embrapa Agropecuária Oeste; Universidade Federal da Grande Dourados, 2013c. 1 CD ROM.

PESSOA, M. C. P. Y.; MARINHO-PRADO, J. S.; SÁ, L. A. N. de; LUCHINI, G. A.; TEIXEIRA, W. P. Flutuação populacional e coloração de adultos de *Diaphorina citri* em *Citrus limonia* em condição controlada de laboratório. In: SILVA, C. D. D. da (org.). **Coletânea nacional sobre entomologia 3**. Ponta Grossa, PR: Atena, 2020b. E-book. cap. 11. p. 127-138.

PESSOA, M. C. P. Y.; MARINHO-PRADO, J. S.; SÁ, L. A. N. de; MINGOTI, R.; HOLLER, W. A.; SPADOTTO, C. A. Priorização de regiões do cerrado brasileiro para o monitoramento de *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 5, p. 697-701, 2016c.

PESSOA, M. C. P. Y.; MARINHO-PRADO, J. S.; SÁ, L. A. N. de; PRADO, S. de S. **Pesquisa exploratória sobre pragas quarentenárias ausentes e exóticas não regulamentadas de potencial importância econômica para as principais commodities brasileiras, visando análise de tendências de comportamento, estabelecimento e controle**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2017. 11 p. Nota Técnica do Observatório Meio Ambiente/Agropensa Embrapa.

PESSOA, M. C. P. Y.; MAZUCHI, T.; SÁ, L. A. N. de Banco de dados bioecológico para apoiar a análise de risco de introdução e estabelecimento de pragas quarentenárias no estado de São Paulo In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 23., 2010, Natal. **Anais...** Natal: Sociedade Brasileira de Entomologia: Emparn, 2010a. 1 CD-ROM.

PESSOA, M. C. P. Y.; MAZUCHI, T.; SÁ, L. A. N. de. **Organização de informações das bases de dados de principais municípios produtores e das principais pragas e agentes de controle biológico da cultura de cana-de-açúcar do estado de São Paulo**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2010b. 17 p. (Relatório Técnico LQC n°841/2010).

PESSOA, M. C. P. Y.; MAZUCHI, T.; SÁ, L. A. N. de. **Organização de informações das bases de dados de principais municípios produtores e das principais pragas e agentes de controle biológico da cultura de citros do estado de São Paulo**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2010c. 17 p. (Relatório Técnico LQC n°842/2010).

PESSOA, M. C. P. Y.; MEYER, J. F. C. A.; FERNANDES, J. F. R.; HABIB, M. E. BICSYS: sistema integrado de análise da dinâmica populacional do bicudo do algodoeiro. In: FEIRA E CONGRESSO DE INFORMÁTICA APLICADA À AGROPECUÁRIA E AGROINDÚSTRIA, 1995, Juiz de Fora. **Resumos expandidos...** Juiz de Fora, MG: Agrosoft: Softex 2000, 1995. 5 p. Trabalho n. 16.

PESSOA, M. C. P. Y.; MEYER, J. F. C. A.; FERNANDES, J. F. R.; HABIB, M. E. E. Numeric simulation system using artificial intelligence to analyze the cotton boll weevil dynamic population. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON QUANTITATIVE METHODS FOR ENVIRONMENTAL SCIENCES, 7., 1996, São Paulo. **Abstracts...** São Paulo : Editora USP, 1996. p. E7-E10.

PESSOA, M. C. P. Y.; MEYER, J. F. C. A.; FERNANDES, J. F. R.; PIEROZZI JUNIOR, I.; HABIB, M. E. Mathematical modeling and numerical simulation applied to the crop-pest-parasitoid interaction. In: CONGRESO INTERNACIONAL DE BIOMATEMÁTICA, 6., 1993, Costa Rica. **Resumos...** Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 1993. 3 p.

PESSOA, M. C. P. Y.; MINGOTI, R.; MORIYA, L. M.; PIVA, P. L. B.; DIOGO, M. de S. Estimativas do desenvolvimento de *Amblypelta nitida* por demandas térmicas em área de macadâmia de São Paulo. In: OLIVEIRA-JUNIOR, J. M. B.; CALVÃO, L. B. (org.). Entomologia: estudos sobre a biodiversidade, fisiologia, controle e importância médica dos insetos 2. Ponta Grossa, PR: Atena, 2022a. cap. 1. p. 1-13.

PESSOA, M. C. P. Y.; MORIYA, L. M.; MINGOTI, R.; MARINHO-PRADO, J. S.; PIVA, P. L. B. *Scirtothrips dorsalis* e prospecção de seu desenvolvimento em condição térmica de Dois Córregos, SP. In: OLIVEIRA-JUNIOR, J. M. B.; CALVÃO, L. B. (org.). Entomologia: estudos sobre a biodiversidade, fisiologia, controle e importância médica dos insetos 2. Ponta Grossa, PR: Atena, 2022b. cap. 5. p. 71-89.

PESSOA, M. C. P. Y.; MINGOTI, R.; MARINHO-PRADO, J. S.; SÁ, L. A. N. de; PARANHOS, B. A. J.; VALLE, L. B. do; LOVISI FILHO, E.; BERALDO, G. N.; FARIAS, A. R. Áreas aptas ao parasitoide exótico *Fopius arisanus* e a *Bactrocera carambolae* considerando seis hospedeiros no Brasil. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 16., 2019, Londrina. Anais... Londrina: SEB: Embrapa, 2019c. p. 455.

PESSOA, M. C. P. Y.; MINGOTI, R.; MARINHO-PRADO, J. S.; SÁ, L. A. N. de; VALLE, L. B. do; LOVISI FILHO, E.; BERALDO, G. N.; FARIAS, A. R. Áreas brasileiras aptas a ocorrência mensal de *Thaumastocoris peregrinus* em *Eucalyptus* spp. In: JASPER, M. (ed.). Coletânea nacional sobre entomologia. Ponta Grossa: Atena, 2019d. p. 74-89.

PESSOA, M. C. P. Y.; MINGOTI, R.; SÁ, L. A. N. de; VALLE, L. B. do; LOVISI FILHO, E.; MARINHO-PRADO, J. S.; BERALDO, G. N.; FARIAS, A. R. Favorabilidade mensal à ocorrência de *Thaumastocoris peregrinus* em *Eucalyptus* spp. nos estados brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 27; CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE ENTOMOLOGIA, 10., 2018, Gramado. Saúde, ambiente e agricultura: anais... Gramado, DF: SEB: UFSM, 2018. p. 811.

PESSOA, M. C. P. Y.; NAVA, D. E.; NEVES, M. F. O.; SÁ, L. A. N. de; GIRARDI, E. A. Simulação numérica de posturas de *Diaphorina citri* em murta e em limão cravo para subsidiar esse hospedeiro em criações laboratoriais de seus bioagentes. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 14., 2015, Teresópolis. Anais... Teresópolis: Sucen: Sociedade Entomológica do Brasil, 2015a. Ref. TCBA230.

PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de; FUJINAWA, M. F. Modelagem e simulação como ferramentas para o estudo de agentes de controle biológico de pragas. In: HALFELD-VIEIRA, B. A.; MARINHO-PRADO, J. S.; NECHET, K. de L.; MORANDI, M. A. B.; BETTIOL, W. (ed.). Defensivos agrícolas naturais: uso e perspectivas. Brasília, DF: Embrapa, 2016d. p. 744-801.

PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de; KODAIRA, J. Y.; WILCKEN, C. F.; ALMEIDA, G. R. Mathematical-modelling simulation of red gum lerp psyllid *Glycaspis brimblecombei* population dynamics towards the strategy identification for biological control with its parasitoid *Psyllaephagus bliteus*. In: CONFERENCE ISEM 2009. ECOLOGICAL MODELLING FOR ENHANCED SUSTAINABILITY IN MANAGEMENT, 2009, Québec City, Canada. Conference handbook. 2009. Québec: International Society for Ecological Modelling, 2009. p. 238.

PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de; KODAIRA, J. Y.; WILCKEN, C. F.; ALMEIDA, G. R. Simulação da dinâmica populacional do psilídeo-de-concha, *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Psyllidae) e identificação de estratégias para a criação laboratorial de seu parasitoide *Psyllaephagus bliteus* (Hymenoptera: Encyrtidae). Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2008. 33 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 49).

PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de; MEDEIROS, A. G. B.; WILCKEN, C. F. Monitoramento de *Thaumastocoris peregrinus*, *Glycaspis brimblecombei* e do parasitoide *Psyllaephagus bliteus* em hortos florestais de Minas Gerais no ano de 2013. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 25., 2014, Goiânia. **Entomologia integrada à sociedade para o desenvolvimento sustentável: anais**. Goiânia: Sociedade Entomológica do Brasil: Embrapa Arroz e Feijão, 2014b. Trabalho 1008.

PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de; MINGOTI, R.; HOLLER, W. A.; MARINHO-PRADO, J. S.; SPADOTTO, C. A. **Avaliação da potencial migração de *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) por massas de ar para áreas produtoras de cultivos hospedeiros do Estado de São Paulo**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016e. 33 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 66).

PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de; MINGOTI, R.; HOLLER, W. A.; MARINHO-PRADO, J. S.; SPADOTTO, C. A. **Potencial migração de *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) para áreas produtoras de cultivos hospedeiros do Estado de São Paulo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FITOSSANIDADE, 3., 2015, Águas de Lindóia. **Novos rumos da fitossanidade no Brasil: anais**. Águas de Lindóia: Unesp, 2015b. p. 242-246.

PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de; SAQUI, G. L.; ROCHA, A. B. O.; WILCKEN, C. F. **Indicadores populacionais de machos e fêmeas do psilídeo-de-concha, *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Psyllidae), em condições de criação em laboratório: longevidade e curvas de sobrevivência**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2010d. 27 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, nº 56).

PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de; VIDAL, S. B.; MEDEIROS, A. G. B.; WILCKEN, C. F. **Flutuações populacionais de pragas exóticas de eucalipto, *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: Psyllidae) e *Thaumastocoris peregrinus* (Hemiptera: Thaumastocoridae) e do bioagente *Psyllaephagus bliteus* (Hymenoptera: Encyrtidae), em monitoramento de hortos florestais de Minas Gerais**. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 13., 2013, Bonito. **Anais...** Bonito: Embrapa Agropecuária Oeste; Universidade Federal da Grande Dourados, 2013d.

PESSOA, M. C. P. Y.; SILVA, A. de S.; CHAIM, A.; SÁ, L. A. N. de; SILVA, C. M. M. de S.; HERMES, L. C.; RODRIGUES, G. S. **Impacto ambiental em fruteiras irrigadas do submédio São Francisco: subsídios para a produção integrada da região**. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 3., 2001, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2001. p. 62-68. (Embrapa Uva e Vinho. Documentos, 32). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/191454/1/2001AA-Pessoa-impacto-ambiental-ID-16338.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2021.

PESSOA, M. C. P. Y.; SILVA, A. de S.; HERMES, L. C.; FREIRE, L. C. L.; LOPES, P. C. C. **Produção integrada de manga e uva**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 1 CD-ROM. Disponível em: [https://www.cnpmia.embrapa.br/projetos/prod\\_int/index.html](https://www.cnpmia.embrapa.br/projetos/prod_int/index.html). Acesso em: 30 jul. 2021.

PIMENTA, F. A.; BARBOSA, C. de J.; NASCIMENTO, A. S. do; PEREIRA, N. A. C.; DIAS, M. C. **Criação massal de *Ageniaspis citricola* para o controle biológico da larva minadora da folha dos citros**. In: JORNADA CIENTÍFICA EMBRAPA MANDIOCA E FRUTICULTURA, 5., 2011, Cruz das Almas. **Anais...** Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2011. 1 CD-ROM.

PORTER, S. D.; SÁ, L. A. N. de. **Mass rearing and realese of decapitating fly *Pseudacteon tricuspis* (Diptera, Phoridae) for fire ant biocontrol in the United States**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 17.; ENCONTRO NACIONAL DE FITOSSANARISTAS, 8., 1998, Rio de Janeiro. **Resumos...** Rio de Janeiro: SEB, 1998. Livro 1, p. 22.

PORTER, S. D.; SÁ, L. A. N. de; COOK, J.; FLANDERS, K.; GORSUCH, C.; KINTZ, J.; SMITH, W.; THOMPSON, L. Successful establishment of fire ant decapitating flies in the United States. In: ENTOMOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA ANNUAL MEETING, 1999, Atlanta, USA. **Abstracts online**. Lanham: Entomological Society of America, 1999a. **Abstract 2345**.

PORTER, S. D.; SÁ, L. A. N. de; FLADERS, K.; THOMPSON, L. Field releases of the decapitating fly, *Pseudacteon tricuspis*. In: IMPORTED FIRE ANT CONFERENCE, 1999, Charleston. **Abstracts...** Charleston: Clemson University, Department of Entomology, 1999b. p. 102.

PRATISSOLI, D.; FORNAZIER, M.; HOLTZ, A. M.; GONÇALVES, J. R.; CHIORAMITAL, A. B.; ZAGO, H. B. Ocorrência de *Trichogramma pretiosum* em áreas comerciais de tomate no Espírito Santo, em regiões de diferentes altitudes. **Horticultura Brasileira**, v. 21, n. 1, p. 73-76, 2003.

PURETZ, B. de O.; SOUZA, A. R. de; CARVALHO, V. R. de; JUNQUEIRA, L. R.; SÁ, L. A. N. de; WILCKEN, C. F. Liberações de *Selitrichodes neseri* (Hymenoptera: Eulophidae) para controle de *Leptocybe invasa* (Hymenoptera: Eulophidae) em eucalipto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 26.; CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE ENTOMOLOGIA, 9., 2016, Maceió. **Anais...** Brasília, DF: Embrapa, 2016. p. 110.

PURETZ, B. de O.; SOUZA, A. R. de; JORGE, C.; CARVALHO, V. R. de; SÁ, L. A. N. de; WILCKEN, C. F. Produção do parasitoide da vespa-da-galha-do-eucalipto, *Selitrichodes neseri* (Hymenoptera: Eulophidae). In: SIMPÓSIO EM PROTEÇÃO DE PLANTAS, 5., 2017, Botucatu. **Anais...** Botucatu: FCA, UNESP: FEPAF, 2017.

QUADROS, A. F. F. ; BATISTA, I. C. A. ; KAUFFMANN, C. M. ; BOARI, A. de J. ; NECHET, K. de L. First report of *Rhizoctonia solani* AGI-IA causing foliar blight in snap-bean in Brazil. **Journal of Plant Pathology**, v. 101, n. 4, p. 1275-1276, 2019.

RAMOS, G. G.; FERRACINI, V. L.; PESSOA, M. C. P. Y. Potencial de transporte de agrotóxicos utilizados no controle de *Drosophila suzukii* e *Aleurocanthus woglumi* por modelos screening. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 15., 2021, Campinas. **Anais...** Campinas: Instituto de Zootecnia, 2021. 12 p. Trabalho n. 21407.

ROBBS, C. F. Subsídios ao histórico do controle biológico de artrópodes fitófagos no Brasil. In: CICLO DE PALESTRAS SOBRE CONTROLE BIOLÓGICO DE PRAGAS, 1992, Campinas. **Palestras...** Campinas: Fundação Cargill, 1992. p. 21-29.

ROCHA, A. B. O.; SÁ, L. A. N. de; PESSOA, M. C. P. Y.; SAQUI, G. L.; ALMEIDA, G. R. de; WILCKEN, C. F. Metodologias para coleta de insetos no campo e para armazenamento em laboratório de criação de *Psyllaephagus bliteus* (Hymenoptera: Encyrtidae) visando o controle biológico do psilídeo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* (Hemiptera: psyllidae) em hortos florestais. **O Biológico**, v. 70, n. 2, p. 170, 2008. Edição dos Resumos da 21ª Reunião Anual do Instituto Biológico, -RAIB, 2008. Resumo 127.

RODRIGUES, G. S.; PARAÍBA, L. C.; MORAES, G. J. de. Pairwise association as a criterion for the selection of collection sites of natural enemies of cassava green mite, *Mononychellus tanajoa* (Bondar). **Scientia Agricola**, v. 53, n. 2/3, p. 324-331, 1996.

SÁ, L. A. N. de. **Bioecologia de *Trichogramma pretiom* Riley, 1879, visando avaliar o seu potencial para controle de *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith, 1797) e *Helicoverpa zea* (Poddie, 1850) em milho.** 1991. 107 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SÁ, L. A. N. de. Enfoque regional relativo à introdução de inimigos naturais no Cone Sul. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 4., 1994, Gramado, RS. **Anais: conferências e mesas redondas**. Pelotas: EMBRAPA-CPACT, 1994. p. 61-64. (EMBRAPA-CPACT. Documentos, 6).

SÁ, L. A. N. de. Impacto ambiental do intercâmbio internacional de agentes de controle biológico de pragas. **G. Bio - Revista de Controle Biológico**, p. 41-44, 2010a.

SÁ, L. A. N. de. Importância, produção, comercialização e regulamentações de agentes de controle biológico no Brasil. In: SEMANA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AGROPECUÁRIA, 22., 1997, Jaboticabal. **Palestras...** Jaboticabal: UNESP, FCAV, 1997.

SÁ, L. A. N. de. Intercâmbio de inimigos naturais benéficos via sistema quarentenário em programas de controle biológico de pragas no Cone Sul. In: ENCONTRO BIENAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA ECOLÓGICA, 5., 2003, Caxias do Sul. **Brasil e Cone Sul: desafios e possibilidades de um desenvolvimento sustentável**. Caxias do Sul: Sociedade Brasileira de Economia Ecológica, 2003.

SÁ, L. A. N. de. Intercâmbio internacional de organismos benéficos pelo Laboratório de Quarentena Costa Lima, no período de 1991 a 2016. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 15., 2017, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: Unesp: Esalq, 2017.

SÁ, L. A. N. de. Sistemas internacionales de información "on line". Separata de: SEMINARIO CIENTÍFICO INTERNACIONAL DE SANIDAD VEGETAL, 5., 2004, Havana. **Memorias...** Havana: OICB, 2004. 3 p.

SÁ, L. A. N. de. **Procedimentos para o monitoramento da larva-minadora-da-folha-dos-citros, *Phyllocnistis citrella* (Lepidoptera: Gracillariidae) e de seu parasitoide exótico *Ageniaspis citricola* (Hymenoptera: Encyrtidae) em pomares cítricos paulistas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2010b. 12 p.

SÁ, L. A. N. de; CANHOS, D.; GATTAZ, N.C. International information system about biological control of pests through the Internet. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF ENTOMOLOGY, 21., 2000, Foz do Iguassu, PR. **Abstracts: symposium and poster session**. Londrina: Embrapa Soja, 2000a. v.1, p. 190. (Embrapa Soja. Documentos, 143).

SÁ, L. A. N. de; CAPALBO, D. M. F.; DE NARDO, E. A. B.; MAIA, A. H. N.; ARELLANO, F.; FUINI, L. C. H. Effects of a formulation of *Bacillus thuringiensis* on the parasitoid *Trichogramma pretiosum* Riley, 1879 (Hymenoptera: Trichogrammatidae) under laboratory conditions. **IOBC/WPRS Bulletin**, v. 21, n. 6, p. 53-59, 1998a.

SÁ, L. A. N. de; CAPALBO, D. M. F.; DE NARDO, E. A. B.; MAIA, A. H. N.; ARELLANO, F.; FUINI, L. C. H. Formulation of *Bacillus thuringiensis* affecting the parasitoid *Trichogramma pretiosum* under bioassay conditions. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON INVERTEBRATE PATHOLOGY AND MICROBIAL CONTROL, 7.; INTERNATIONAL CONFERENCE ON BACILLUS THURINGIENSIS ,4., 1998, Sapporo, Japão. **Abstracts...** Sapporo, 1998b. p. 26.

SÁ, L. A. N. de; CAPALBO, D. M. F.; DE NARDO, E. A. B.; MAIA, A. H. N.; ARELLANO, F.; FUINI, L. C. H. Studies for evaluating effects of *Bacillus thuringiensis* on nontarget egg parasite insect, *Trichogramma pretiosum*. In: PACIFIC RIM CONFERENCE ON BIOTECHNOLOGY, 3., 1999, Wuhan, China. **Biotechnology of Bacillus thuringiensis**. Beijing: Science Press, 1999a. v. 3, p. 238.

SÁ, L. A. N.; COSTA, V. A.; OLIVEIRA, W. P. de; ALMEIDA, G. R. de. Parasitoides de *Phyllocnistis citrella* em Jaguariúna, estado de São Paulo, Brasil, antes e depois da introdução de *Ageniaspis citricola*. *Scientia Agrícola*, v. 57, n. 4, 2000b. p. 799-801.

SÁ, L. A. N. de; COSTA V. A. da; TAMBASCO, F. J.; OLIVEIRA, W. P. de; ALMEIDA, G. R. de. **Parasitoides da larva-minadora-da-folha-dos-citrus, *Phyllocnistis citrella* Station, estudos no laboratório de quarentena “Costa Lima” em Jaguariúna, SP.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 1999b. 4 p. (Embrapa Meio Ambiente. Comunicado Técnico, 2).

SÁ, L. A. N. de; COSTA, V. A.; TAMBASCO, F. J.; OLIVEIRA, W. P. de; ALMEIDA, G. R. de; PEREIRA, R. A. A. Pos-introduction of the natural enemy *Ageniaspis citricola* in citrus groves in Jaguariúna and Aguai regions, São Paulo State, Brazil: preliminary results. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF ENTOMOLOGY, 21., 2000, Foz do Iguaçu. **Abstracts: symposium and poster session.** Londrina: Embrapa Soja, 2000c. v. 1, p. 414. (Embrapa Soja. Documentos, 143).

SÁ, L. A. N. de.; DE NARDO, E. A. B.; TAMBASCO, F. J. Quarentena de agentes de controle biológico. In: PARRA, J. R. P.; BOTELHO, P. S. M.; CORRÊA-FERREIRA, B. S.; BENTO, J. M. S (ed.). **Controle biológico no Brasil: parasitoides e predadores.** Barueri: Manole, 2002. p. 43-70.

SÁ, L. A. N. de; LUCCHINI, F. Regulamentação do intercâmbio internacional de agentes de controle biológico no Brasil. In: BUENO, V. H. P. **Controle biológico de pragas: produção massal e controle de qualidade.** Lavras: UFLA, 2009. p. 411-429.

SÁ, L. A. N. de; MORAES, G. J. de. **Ácaros de importância quarentenária.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 25) .

SÁ, L. A. N. de; MORAES, G. J. de; GATTAZ, N. C.; CANHOS, D. International information system on biological control. In: OILB/IOBC INTERNATIONAL CONFERENCE, 1996, Montpellier, France. **Abstracts...** Montpellier: OILB/IOBC, 1996. p. 263.

SÁ, L. A. N. de; OLIVEIRA, M. R. V. de. Inimigos naturais exóticos potenciais para o controle biológico de pragas com risco de entrada no país. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 9., 2005, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Entomológica do Brasil, 2005. p. 57.

SÁ, L. A. N.; OLIVEIRA, M. R. V. Perspectivas do controle biológico de pragas no Brasil. In: PINTO, A. S.; NAVA, D. E.; ROSSI, M. M.; MALERBO-SOUZA, D. T. (org.). **Controle biológico de pragas na prática.** Piracicaba: CP2, 2006. p. 255-287.

SÁ, L. A. N. de; OLIVEIRA, W. P. de; ALMEIDA, G. R. de; PEREIRA, R. A. A.; ALMEIDA, E. G. de; FRANCHIM, T.; STECCA, L. F. F. Flutuação populacional de larva-minadora-da-folha-do-citrus e de seus inimigos naturais em três sistemas de produção cítrica no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 9., 2005, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Entomológica do Brasil, 2005. p. 150.

SÁ, L. A. N. de; OLIVEIRA, W. P. de; HONDA, E.; ALMEIDA, G. R. de. **Avaliação pós-liberação do parasitoide exótico *Ageniaspis citricola* (Hym.: Encyrtidae) em pomares cítricos no estado de São Paulo.** In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 7., 2001, Poços de Caldas, MG. **Livro de resumos...** Lavras: Universidade Federal de Lavras; Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001a. p. 71.

SÁ, L. A. N. de; PARRA, J. R. P. Biology and parasitism of *Trichogramma pretiosum* Riley, 1879, on *Anagasta kuehniella* (Zeller, 1879) and *Helicoverpa zea* (Boddie, 1850) eggs. *Journal of Applied Entomology*, v. 118, n. 1-5, p. 38-43, 1994a.

SÁ, L. A. N. de; PARRA, J. R. P. Efeito do número e intervalo entre liberações de *Trichogramma pretiosum* Riley no parasitismo e controle de *Helicoverpa zea* (Boddie), em milho. *Scientia Agricola*, v. 50, n. 3, p. 355-359, 1993.

SÁ, L. A. N. de; PARRA, J. R. P. Natural parasitism of *Spodoptera frugiperda* and *Helicoverpa zea* (Lepidoptera: Noctuidae) eggs in corn by *Trichogramma pretiosum* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) in Brazil. *Florida Entomologist*, v. 77, n. 1, p. 185-188, 1994b.

SÁ, L. A. N. de; PARRA, J. R. P.; SILVEIRA NETO, S. Capacidade de dispersão de *Trichogramma pretiosum* Riley, 1879 para controle de *Helicoverpa zea* (Boddie, 1850) em milho. *Scientia Agricola*, v. 50, n. 2, p. 226-231, 1993.

SÁ, L. A. N. de; PESSOA, M. C. P. Y. Prospecção de inimigos naturais para o controle biológico de pragas agrícolas exóticas. In: SUGAYAMA, R. L.; SILVA, M. L. da.; SILVA, S. X. de B.; RIBEIRO, L. C.; RANGEL, L. E. P. (ed.). *Defesa vegetal: fundamentos, ferramentas, políticas e perspectivas*. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Defesa Agropecuária, 2015. p. 256-274.

SÁ, L. A. N. de ; PESSOA, M. C. P. Y. ; MORAES, G. J. de ; PRADO, J. S. M. ; PRADO, S. de S.; VASCONCELOS, R. M. de. Quarantine facilities and legal issues of the use of biocontrol agents in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, n. 5, p. 502-509, 2016a. Disponível e: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/146073/1/Quarantine-facilities-and-legal.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2021.

SÁ, L. A. N. de; PESSOA, M. C. P. Y.; PEREIRA, R. A. A.; SILVA, J. R. da **Estabelecimento de metodologia para controle biológico de *Blastopsylla occidentalis* em plantações de *Eucalyptus* spp.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2018a. Relatório Institucional - Apoio a Políticas Públicas. Não publicado.

SÁ, L. A. N.; PESSOA, M. C. P. Y.; PRADO, J. S. M.; HALFELD-VIEIRA, B. A.; PRADO, S. S.; WILCKEN, C. F. Possibilities on technical-cooperation between “Costa Lima” quarantine laboratory of EMBRAPA environment (Brazil) and worldwide research institutions promoting biological control programs overseas. In: IUFRO FOREST PROTECION JOINT MEETING, 2011, Colonia Del Sacramento. **Resúmenes...** Colonia del Sacramento: INIA: IUFRO, 2011. 2 p.

SÁ, L. A. N. de; PESSOA, M. C. P. Y.; SAQUI, G. L.; ROCHA, A. B. O. Avaliação das constantes térmicas das fases de desenvolvimento do Psilídeo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* em laboratório. *Revista Agrogeoambiental*, v. 1, n. 2, p. 31-38, 2009.

SÁ, L. A. N. de; PESSOA, M. C. P. Y.; SAWAZAKI, H. E.; TANAKA, J. A. C. de S.; VEIGA, R. F. A.; WILCKEN, C. F.; DUDIENAS, C.; ROSSI, C. E.; TEIXEIRA, E. P.; DEUBER, R. Desenvolvimento de métodos e aplicativos para sistemas quarentenários em apoio à defesa agropecuária nas culturas de citros, cana-de-açúcar, eucalipto e flores/plantas ornamentais no Estado de São Paulo. In: FÓRUM DE APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS DE PESQUISA: AVANÇOS E OPORTUNIDADES, 1., 2014, Jaguariúna. **Anais...** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2014a. RE017. 9p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/126290/1/2014AA82.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2021.

SÁ, L. A. N. de; PESSOA, M. C. P. Y.; WILCKEN, C. F. Metodologia de criação do percevejo bronzeado *Thaumastocoris peregrinus* (Hemiptera: Thaumastocoridae) em condição controlada de quarentena. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 25., 2014, Goiânia. Entomologia integrada à sociedade para o desenvolvimento sustentável. *Anais...* Goiânia: Sociedade Entomológica do Brasil: Embrapa Arroz e Feijão, 2014b. Trabalho 1020.

SÁ, L. A. N. de; PESSOA, M. C. P. Y.; WILCKEN, C. F.; JUNQUEIRA, L. R.; LAWSON, S. A. Contributions of quarantine laboratory “Costa Lima” of EMBRAPA Meio Ambiente to the classical biological control of exotic *Eucalyptus* pests in Brazil. In: IUFRO WORKING PARTY 7.02.13 MEETING, FOREST HEALTH IN SOUTHERN HEMISPHERE COMMERCIAL PLANTATIONS, 1., 2018, Punta del Este. *Book of abstracts...* Punta del Este: IUFRO, 2018b. Ref. 33. p. 42.

SÁ, L. A. N.; PESSOA, M. C. P. Y.; WILCKEN, C. F.; MEDEIROS, A. G. B.; TEIXEIRA, J. T. Monitoramento da praga exótica psilídeo-de-concha *Glycaspis brimblecombei* e de seu parasitoide exótico *Psyllaephagus bliteus* no controle biológico desta praga em florestas de eucalipto nos estados de SP e MG. In: FÓRUM DE APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS DE PESQUISA: AVANÇOS E OPORTUNIDADES, 1., 2014, Campinas. *Anais...* Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2014c. 8 p. RE018.

SÁ, L.A.N. de; PORTER, S. D. Evaluation and export of *Pseudacteon* decapitating flies (Phoridae : Diptera) collect in the Jaguariúna area for fire ant biocontrol in the USA. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 6., 1998, Rio de Janeiro. *Resumos...* Rio de Janeiro: FIOCRUZ, 1998.

SÁ, L. A. N. de; RADABAUGH, G.; MORGAN, D. J. W.; HODDLE, M. S. Exploratory search for biological control agents of the Asian citrus psyllid *Diaphorina citri*. In: INTERNATIONAL CITRUS CONGRESS, 13., 2016, Foz do Iguaçu. *Sustainable citriculture: the role of applied knowledge: abstract book*. Campinas: IAC; Londrina: IAPAR, 2016b. p. 68-69. Resumo S4-252.

SÁ, L. A. N. de; SOUZA, C. N. de. Criação da praga cítrica *Diaphorina citri* (hemiptera: lividae) em laboratório para controle biológico da doença *huanglongbing* (HLB). In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 9., 2015, Campinas. *Anais...* Campinas: IAC, 2015. 8 p.

SÁ, L. A. N. de; TAGLIARI, B. T.; OLIVEIRA, M. R. V. de; ALMEIDA, G. R. de; ROCHA, A. B. de O. *Mosca-negra-dos-citros* *Aleurocanthus woglumi* Ashby (Hemiptera: Aleyrodidae) em culturas de citros e de mangueira no estado de São Paulo e observações de sua biologia e controle. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2008. 4 p. (Embrapa Meio Ambiente. Comunicado Técnico, 46).

SÁ, L. A. N. de; TAMBASCO, F. J.; LUCCHINI, F. Importação, exportação e regulamentação de agentes de controle biológico no Brasil. In: BUENO, V. H. P. (coord.). *Controle de qualidade de agentes de controle biológico*. Lavras: UFLA, 1999c. p. 187-196.

SÁ, L. A. N. de; TAMBASCO, F. J.; LUCCHINI, F. Quarentena e intercâmbio internacional de agentes de controle biológico de pragas/Quarantine and the exchange of biological control agents of pests. *O Biológico*, v. 62, n. 2, p. 215-217, 2000d.

SÁ, L. A. N. de; TAMBASCO, F. J.; LUCCHINI, F.; DE NARDO, E. A. B. Controle biológico clássico de pragas exóticas na fruticultura: contribuição do laboratório de quarentena “Costa Lima”. In: VILELA, E.; ZUCCHI, R. A.; CANTOR, F. (ed.). *Histórico e impacto das pragas introduzidas no Brasil*. Ribeirão Preto: Holos, 2001b. p. 154-160.

SÁ, L. A. N. de; WILCKEN, C. F. **Nova praga exótica no ecossistema florestal**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. (Embrapa Meio Ambiente. Comunicado Técnico n. 18).

SANCHEZ, I. M. R. X. A. **Alternativas de controle de *Anticarsia gemmatalis* e *Diaphorina citri***. 2018. 70 f. (Dissertação).

SANCHEZ, N. F.; CARVALHO, R. S. **Procedimentos para manejo da criação e multiplicação do predador exótico *Cryptolaemus montrouzieri***. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2010. (Embrapa Mandioca e Fruticultura. Circular Técnica, 99).

SARTORI, C. A.; PESSOA, M. C. P. Y.; SA, L. A. N. de; MEDEIROS, A. G. B.; WILCKEN, C. F. Monitoramento do psilídeo-de-concha, do percevejo bronzeado e do bioagente *Psyllaephagus bliteus* em hortos de *Eucalyptus* sp. em Minas Gerais em 2014. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 9., 2015, Campinas. **Anais...** Campinas: IAC, 2015. 8 p.

SAQUI, G. L.; PESSOA, M. C. P. Y.; SA, L. A. N. de; ROCHA, A. B. de O.; ALMEIDA, G. R. de; WILCKEN, C. F.; MENDES, R. R. Aspectos biológicos do psilídeo-de-concha *Glycaspis Brimblecombei* (Hemiptera: Psyllidae) em condições de laboratório. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2., 2008, Campinas. **Anais...** Campinas: ITAL: IAC; Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2008. 8 p. 1 CD-ROM.

SAWAZAKI, H. E.; GONÇALVES, C. R. N. C. B.; SA, L. A. N. de; VEGA, R. F. A.; RIBEIRO, C.; MARTINS, M. C.; CARVALHO, V. C.; SENGER, M. M. M. Análises moleculares de bactérias e fungo em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO PAULISTA DE FITOPATOLOGIA, 33., 2010, Ituverava. **Resumos...** Ituverava: Grupo Paulista de Fitopatologia, 2010.

SAWAZAKI, H. E.; SÁ, L. A. N. de; ALCÂNTARA, M. Q.; POLEZ, V. L. P.; GONÇALVES, C. R. N. C. B.; VEIGA, R. F. A.; COLOMBO, C. A. Otimização da diagnose molecular de vírus, bactéria e fungo em cana-de-açúcar. **Biológico, São Paulo**, v. 73, n. 2, p. 282-287, 2011. Edição dos anais da 24ª Reunião Anual do Instituto Biológico, São Paulo, nov. 2011a.

SAWAZAKI, H. E.; SÁ, L. A. N. de; GONÇALVES, C. R. N. C. B.; VEIGA, R. F. A.; COLOMBO, C. A. Molecular diagnosis optimization of virus, bacteria and fungi in sugarcane. **International Research Journal of Plant Science**, v. 4, n. 3, p. 76-83, 2013.

SAWAZAKI, H. E.; SIQUEIRA, D. M.; GONÇALVES, C. R. N. C. B.; SA, L. A. N. de; FERREIRA, D. N. M.; POLEZ, V. L. P.; VEIGA, R. F. A. Validação preliminar de marcadores de resistência a ferrugem marrom (*Puccinia melanocephala*) para a ferrugem laranja (*P. kuehni*) da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO PAULISTA DE FITOPATOLOGIA, 34., 2011, Campinas. **Resumos...** Campinas: Grupo Paulista de Fitopatologia, 2011b. Resumo n. 200. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/56076/1/2011RA091.pdf>. Acesso: 25 jul. 2021.

SERAFIM, C. A.; SÁ, L. A. N. de; PESSOA, M. C. P. Y.; WILCKEN, C. F. Monitoramento em três hortos florestais de eucalipto no Estado de São Paulo da praga exótica percevejo bronzeado *Thaumastocoris peregrinus* (Hemiptera: Thaumastocoridae). In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 5., Campinas. **Anais...** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2011. 6 p. Trabalho n. 11402.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Sistema Nacional de Informações Florestais – SNIF. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/dados-complementares/453-as-florestas-plantadas-iba-painel-interativo>. Acesso em: 21 ago. 2021.

SILVA, A. de S.; LOPES, P. R. C.; PESSOA, M. C. P. Y.; SILVA, C. M. M. S.; FERRACINI, V. L.; HERMES, L. C.; SA, L. A. N. de; HAMMES, V. S.; FRIGHETTO, R. T. S.; CHAIM, A.; HAJI, N. P.; RAMOS, M. F.; MIRANDA, J. I.; FREIRE, L. C. L. Novas estratégias de pesquisa e desenvolvimento na produção integrada de frutas (PIF): 1. projeto de pesquisa em produção integrada de manga. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO INTEGRADA DE FRUTAS, 2., 2000, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2000. p. 36-50. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/61378/1/2000AA002.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2021.

SILVA, D. M. da; SILVA, U. T. F. da; NASCIMENTO, A. S.; GAMA, F. C.; PARANHOS, B. A. J. Preferência de *Cryptolaemus montrouzieri* (Col.: Coccinellidae) sobre ninfas de *Maconelicoccus hirsutus* (Hemip.: Pseudococcidae) e ovos de *Ceratitis capitata* (Dip.: Tephritidae). In: JORNADA CIENTÍFICA DA EMBRAPA MANDIOCA E FRUTICULTURA, 12., 2018, Cruz das Almas. **Anais...** Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2019a.

SILVA, R. A. da; JORDÃO, A. L.; MARINHO, C. F.; SÁ, L. A. N. de; OLIVEIRA, M. R. V. Braconidae parasitoide de moscas das frutas em quatro municípios do estado do Amapá. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 9., 2005, Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Entomológica do Brasil, 2005a. p. 143.

SILVA, R. A.; JORDÃO, A. L.; SÁ, L. A. N.; OLIVEIRA, M. R. V. *Mosca-da-carambola: uma ameaça à fruticultura brasileira*. Macapá: Embrapa Amapá, 2004. p. 1-15 (Embrapa Amapá. Circular Técnica, 31).

SILVA, R. A. da; SILVA, W. R. da; SÁ, L. A. N. de. Parasitóide de moscas-das-frutas no Estado do Amapá, Brasil. In: CONGRESO VIRTUAL IBEROAMERICANO SOBRE GESTIÓN DE CALIDAD EN LABORATORIOS, 3., 2005, Madrid. Libro de comunicaciones: tomo I. Madrid: Ministério da Agricultura, Pesca y Alimentación, 2005b. p. 381-386.

SILVA, U. T. F. da; SILVA, D. M. da; GAMA, F. de C.; PARANHOS, B. A. J. Criação de *Cryptolaemus montrouzieri* sobre ovos de *Ceratitis capitata* como hospedeiro alternativo. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA SEMIÁRIDO, 14., 2019, Petrolina. **Anais...** Petrolina: Embrapa Semiárido, 2019b. p. 91-95. (Embrapa Semiárido. Documentos, 288).

SIVIERO, A.; MACEDO, P. E. F.; MOREIRA, G. T. S.; NECHET, K. de L.; COELHO, R. M. S.; HALFELD-VIEIRA, B. A. First report of cassava leaf blight caused by *Rhizoctonia solani* AG-1 IA. **Australian Plant Disease Notes**, v. 14, n. 1, article 25, 2019.

SIQUEIRA, C. de A.; MINGOTI, R.; PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de; MARINHO-PRADO, J. S. Levantamento das áreas com condições favoráveis a maior ocorrência populacional de *Thaumastocoris peregrinus* no território brasileiro. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 14., 2020, Campinas. **Anais...** Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2020. 12 p. RE20509.

SIQUEIRA, D. M.; SAWAZAKI, H. E.; GONÇALVES, C. R. N. C. B.; SA, L. A. N. de; POLEZ, V. L. P.; VEIGA, R. F. de A. Validação de marcadores moleculares ligados a genes de resistência da ferrugem marrom para a ferrugem laranja da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 5., 2011, Campinas. **Anais...** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2011.

SOARES, D. J.; NECHET, K. de L. *Dichotomophthora* sp. causing leaf spot and foliar abscission on *Anredera cordifolia* in Brazil. **Australasian Plant Disease Notes**, v. 12, p. 51, 2017.

SOUZA, A. R. de; PURETZ, B. de O.; CARVALHO, V. R. de; SÁ, L. A. N. de; BARBOSA, L. R.; WILCKEN, C. F. Multiplicação de *Selitrichodes neseri* (Hymenoptera: Eulophidae), parasitoide da vespa-da-galha-do-eucalipto, em laboratório. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 26.; CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE ENTOMOLOGIA, 9., 2016, Maceió. *Anais...* Brasília, DF: Embrapa, 2016. p. 343. SOUZA, H. D. A broca da cana-de-açúcar e seus parasitos em Campos, estado do Rio de Janeiro. *Boletim do Instituto de Experimentação Agrícola*, n. 4, p. 1-22, 1943.

STIVANELLI, A.; PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de; SILVA, J. P. da Estimativa de estágios ninfais do psilídeo-de-concha em função dos tamanhos de conchas. *Revista Agrogeoambiental*, v. 1, n. 3, p. 73-78, dez. 2009.

SUJI, E. R.; TIGANO, M. S.; SOSA-GOMES, D. Simulação do impacto do fungo *Nomurea rileyi* em populações da lagarta da soja. *Anticarsia gemmatalis Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, n. 11, p. 1551-1558, 2002.

TAGLIARI, B. T.; SÁ, L. A. N. de; OLIVEIRA, M. R. V.; ALMEIDA, G. R. de. Ocorrência de *Aleurocanthus woglumi* Ashby (Hemiptera: Aleyrodidae) em pomares de citros e mangueira no estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 22., 2008, Uberlândia. Ciência, tecnologia e inovação: *Anais...* Viçosa: UFV, 2008a. 1 p.

TAGLIARI, B. T.; SÁ, L. A. N. de; OLIVEIRA, M. R. V.; ALMEIDA, G. R. de; ROCHA, A. B. O. Ocorrência de *Aleurocanthus woglumi* Ashby (Hemiptera: Aleyrodidae) na cultura da mandioca no estado de São Paulo. *Biológico*, São Paulo, v. 70, n. 2, p. 155, 2008a. Edição dos resumos da 21ª Reunião Anual do Instituto Biológico, São Paulo, SP, 2008b.

TAMBASCO, F. J. Cochonilha rosada está na fronteira com a Guiana. *Revista do Fundecitrus*, v. 13, n. 89, p. 15, 1998.

TAMBASCO, F. J.; DE NARDO, E. A. B.; SÁ, L. A. N. de; LUCCHINI, F.; TAVARES, M. T. Cochonilha-rosada *Maconellicoccus hirsutus* (Green) (Homoptera: Pseudococcidae): uma ameaça para a fruticultura brasileira. In: VILELA, E.; ZUCCHI, R. A.; CANTOR, F. (ed.). *Histórico e impacto das pragas introduzidas no Brasil, com ênfase na fruticultura*. Ribeirão Preto: Holos, 2001a. p. 149-153.

TAMBASCO, F. J.; MORAES, G. J. de; SÁ, L. A. N. de; LUCCHINI, F.; DE NARDO, E. A. B.; BERTI FILHO, E.; CICIOLA, A. I.; FONTES, E. M. G.; PARRA, J. R. P. *Intercâmbio internacional e quarentena de agentes de controle biológico e outros organismos: 1991-1996*. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1997. 85 p.

TAMBASCO, F. J.; SÁ, L. A. N.; DE NARDO, E. A. B.; TAVARES, M. T. Cochonilha rosada, *Maconellicoccus hirsutus* (Green): uma praga de importância quarentenária já se encontra na guiana inglesa. *Floresta*, v. 30, n. 1/2, p. 85-93, 2000.

TAMBASCO, F. L.; SÁ, L. A. N. de; LUCCHINI, F.; DE NARDO, E. A. B.; SILVA, J. L. da. *Atividades de importação e exportação do Laboratório de Quarentena “Costa Lima” no período de 1991 a 2000*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001b. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 29). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/131402/1/2001DC01.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2021.

TAVARES, M. T.; DE NARDO, E. A. B. Espécimes “voucher” e sua importância em Laboratório de Quarentena. In: COSTA, V. A.; DE NARDO, E. A. B. *Curadoria de coleções entomológicas, com ênfase a microhimenópteros parasitoides: manual técnico*. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1998. p. 65-68. (EMBRAPA-CNPMA. Documentos, 16).

TEIXEIRA, W. P.; LUCHINI, G. A.; SOUZA, G. M.; MARINHO-PRADO, J. S.; PESSOA, M. C. P. Y. Simulação da dinâmica populacional de *Helicoverpa armigera* com base em dados de feijão cultivar pérola em sala de criação laboratorial. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 11., 2017, Campinas. **Anais...** Campinas: Instituto Agrônômico, 2017. 12 p. Trabalho n. 17422. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/176500/1/2017-AA-Conceicao-Simulacao-15923-.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2021.

TERNES, S.; BONATO, O.; SÁ, L. A. N. de; YANG, H. M. Spatio-temporal distribution of citrus leafminer and its natural enemies in São Paulo State, Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF ENTOMOLOGY, 21., 2000, Foz do Iguassu. **Abstracts: symposium and poster session**. Londrina: Embrapa Soja, 2000.

UNIVERSITY OF CALIFORNIA RIVERSIDE. Center For Invasive Species Research. **The Center for Invasive Species Research Mission**. 2016. Disponível em: [http://cisr.ucr.edu/about\\_cisr.html](http://cisr.ucr.edu/about_cisr.html). Acesso em: 5 maio 2017.

VASCONCELOS, R. M. de. **Marco regulatório sobre acesso à amostra de patrimônio genético nativo e acesso ao conhecimento tradicional associado**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2012a. 58 p.

VASCONCELOS, R. M. de. **Marco regulatório sobre transporte e remessa de amostra de patrimônio genético**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2012b. 45 p.

VIDAL, S. B.; LAZARIN, D. F.; PESSOA, M. C. P. Y.; SÁ, L. A. N. de. Monitoramento do percevejo bronzeado (*Thaumastocoris peregrinus*) em hortos de *Eucalyptus* spp de três regionais do estado de Minas Gerais. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6., 2012, Jaguariúna. **Anais...** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2012. N. 12420.

WALDER, J. M.; LOPES, L. A.; COSTA, M. L. Z.; SESSO, J. N.; TONIN, G.; CARVALHO, M. L.; LARA, P. Criação e liberação do parasitoide *Diachasmimorpha longicaudata* (Ashmead) (Hymenoptera: Braconidae) para controle de moscas-das-frutas no estado de São Paulo. **Laranja v. 16, n. 1, p. 149-153, 1995.**

WATANABE, M. A.; DE NARDO, E. A. B.; MORAES, G. J. de; MAIA, A. de H. N.; MARIGO, A. L. S. Avaliação de risco de biopesticidas sobre insetos benéficos: *Baculovirus anticarsia* X *Podisus nigrispinus*. 1996. In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 5., 1996, Foz do Iguaçu. **Anais...** sessão de posters. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 1996. p. 270. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/203499/1/Watanabe-Avaliacao.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2021.

WATANABE, M. A.; FERRAZ, J. M. G.; MORSOLETO, R. V.; SILOTO, R. C. Pragas da cultura de milho (*Zea mays* L.) e seu inimigo natural *Doru* sp. na região de Guaíra, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 15., 1995, Caxambu. **Resumos...** Piracicaba: SEB, 1995. p. 381 Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/147867/1/1995P008-Watanabe-Pragas-2412.PDF>. Acesso em: 13 ago. 2021.

WATANABE, M. A.; MORAES, G. J. de; GASTALDO JÚNIOR, I. Efeito de diferentes pesticidas sobre os ácaros predadores *Phytoseiulus macropilis* e *Amblyseius idaeus* (Acari: Phytoseiidae). In: SIMPÓSIO DE CONTROLE BIOLÓGICO, 3., 1992, Águas de Lindóia. **Anais**. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPDA, 1992. Disponível: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/147887/1/1992P004-Watanabe-Efeito-1478.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2021.

WATANABE, M. A.; MORAES, G. J. de; GASTALDO JÚNIOR. I.; NICOLELLA, G. Controle biológico do ácaro rajado com ácaros predadores fitoseídeos (Acari: Tetranychidae, Phytoseiidae) em culturas de pepino e morango. *Scientia Agricola*, v. 51, n. 1, p. 75-81, 1994. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/147868/1/1994AP001-Watanabe-Control-2748.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2021.

WATANABE, M. A.; MORSOLETO, R. V. Inimigos naturais da parte aérea da cultura de feijão tratada com EM (*Efficient Microorganisms*), na região de Guaira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 16.; ENCONTRO NACIONAL DE FITOSSANITARISTAS, 7., 1997, Salvador. **Resumos...** Salvador: SEB / EMBRAPA-CNPME, 1997. p. 104

WILCKEN, C. F.; BARBOSA, L. R.; JUNQUEIRA, L. R.; SÁ, L. A. N. de; ZANUNCIO, J. C.; FURTADO, E. L. Eucalyptus plantations health in Brazil: a perspective. In: IUFRO WORKING PARTY 7.02.13 MEETING, FOREST HEALTH IN SOUTHERN HEMISPHERE COMMERCIAL PLANTATIONS, 1., 2018, Punta del Este. **Book of abstracts...** Punta del Este: IUFRO, 2018. p. 22.

WILCKEN, C. F.; BARBOSA, L. R.; SÁ, L. A. N. de; ZANUNCIO, J. C. Is classical biological control viable in large scale forest plantations? *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 39, e201902043, Special issue, p. 441, 2019. Abstracts of the XXV IUFRO World Congress, 2019. p. 441

WILCKEN, F. C.; BARBOSA, L. R.; VELOZO, S. M.; BECCHI, L. K.; JUNQUEIRA, L. R.; SÁ, L. A. N. de; ZANUNCIO, J. C. Biological control of *Thaumastocoris peregrinus* (Hemiptera: Thaumastocoridae) in Eucalyptus plantations in Brazil: an update. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BIOLOGICAL CONTROL OF ARTHROPODS, 5., 2017, Langkawi. **Proceedings...** Wallingford: CABI, 2017. p. 105-107.

WILCKEN, F. C.; BARBOSA, L. R.; ZACHE, B.; FIRMINO, A.; L. A. N. de; ZANUNCIO, J. C.; JUNQUEIRA, L. R. Biological control of bronze bug, *Thaumastocoris peregrinus* in Eucalyptus plantations in Brazil. *The International Forestry Review*, v. 16, n. 5, p. 325, 2014. Edição dos abstracts do 24º IUFRO World Congress, 2014, Salt Lake City. Sustaining forests, sustaining people: the role of research.

WILCKEN, F. C.; BERTI FILHO, E. *Vespa da galha do eucalipto (Leptocybe invasa) (Hymenoptera: Eulophidae): nova praga de florestas de eucalipto no Brasil*. Botucatu: IPEF, 2008. 11 p. (Alerta Protef). Disponível em: <http://www.ipef.br/protecao/alerta-leptocybe-invasa.pdf>. Acesso em: 4 dez 2017.

WILCKEN, C. F.; COUTO, E. B.; ORLATO, C.; FERREIRA FILHO, P. J.; FIRMINO, D. C. **Ocorrência do psilídeo-de-concha (*Glycaspis brimblecombei*) (Hemiptera: Psyllidae) em florestas de eucalipto no Brasil**. Piracicaba: Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais, 2003. 11 p. (IPEF, São Paulo. Circular Técnica, 201).

WILCKEN, C. F.; SOLIMAN, E. P.; SÁ, L. A. N. de; BARBOSA, L. R.; DIAS, T. K. R.; FERREIRA FILHO, P. J.; OLIVEIRA, R. J. R. Bronze bug *Thaumastocoris peregrinus* Carpintero and Dellapé (Hemiptera: Thaumastocoridae) on Eucalyptus in Brazil and its distribution. *Journal of Plant Protection Research*, v. 50, n. 2, p. 201-205, 2010.

ZUCCHI, O. L. A. D.; PARRA, J. R. P.; SILVEIRA NETO, S. Desenvolvimento de um modelo determinístico compartimental para simular o controle de *H. virescens* (Fabr., 1781) através de *Trichogramma* spp. *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil*, v. 18, n. 2, p. 357-365, 1989.

# O PAPEL DO MICROBIOMA DA RIZOSFERA NO DESENVOLVIMENTO E PROTEÇÃO DAS PLANTAS

*Rodrigo Mendes, Wagner Bettiol, Josiane de Barros Chiaramonte, Lilian Simara Abreu Soares Costa, Lucas William Mendes, Maike Rossmann, Vanessa Nessner Kavamura Noguchi, Fernando Dini Andreote e Itamar Soares de Melo*

## INTRODUÇÃO

A conclusão do sequenciamento do genoma humano, com o Human Genome Project no ano de 2003 (Schmutz et al., 2004), representou um marco disruptivo na história da ciência. Não apenas pelo fato de elucidar o código da vida, mas também por impulsionar o desenvolvimento de ferramentas moleculares que permitem o acesso facilitado ao código genético dos seres vivos. O sequenciamento completo do genoma humano permitiu avanços sem precedentes no conhecimento do funcionamento do corpo humano. Porém, a evolução do conhecimento com a aplicação das técnicas moleculares revelou que, para o entendimento pleno do funcionamento do corpo, seria necessária a elucidação da contribuição do microbioma humano, também chamado de “outro genoma” (Zhao, 2010) ou “segundo genoma” (Grice; Segre, 2012). Com isso, em 2007, iniciou-se o NIH Human Microbiome Project, com o objetivo de desvendar a composição e funcionalidade dos microrganismos que habitam o corpo humano. O microbioma humano, definido como o conjunto de microrganismos com seus genomas (i.e., genes) nas condições ambientais onde vivem, é composto por um número de células microbianas maior que o número de células do próprio corpo. Enquanto o ser humano possui cerca de 20.000 genes, o microbioma carrega um conjunto de mais de 1.000.000 de genes que, de certa forma, atuam em conjunto com o genoma humano no corpo. Estes dados ilustram a complexidade do sistema hospedeiro-microbioma e reforçam a necessidade de tratar o microbioma como uma extensão do genoma humano para se entender o desempenho do hospedeiro no ambiente.

A partir do momento em que as tecnologias usadas para o sequenciamento do genoma humano (em especial aquele de segunda geração) foram aplicadas ao sequenciamento de microbiomas, houve uma revolução no campo da microbiologia. Não é

exagero comparar o sequenciamento massivo de microrganismos ao aperfeiçoamento do microscópio por Antoine van Leeuwenhoek nos anos de 1670. Da mesma forma que a invenção do microscópio revelou um universo de minúsculos seres, abrindo caminho para o desenvolvimento da microbiologia, a possibilidade do sequenciamento de microbiomas representa a “reinvenção” do microscópio, permitindo o entendimento de como comunidades complexas de microrganismos se associam, interagem e sustentam a vida de seus hospedeiros. Não apenas os seres humanos, mas também os demais seres vivos hospedam uma enorme diversidade de microrganismos, seja na superfície de seus tecidos ou em seu interior, de maneira que os princípios usados no estudo do microbioma humano podem ser aplicados no estudo de plantas, insetos, esponjas do mar, aves, répteis, peixes e, virtualmente, de todos os demais seres vivos.

Curiosamente, há muitas similaridades na forma com que os seres vivos dependem de seus respectivos microbiomas para diversas características e funções, incluindo o papel-chave no desenvolvimento de doenças, na promoção da saúde, no enfrentamento de estresses abióticos, na nutrição e em seu crescimento e desenvolvimento. Uma comparação interessante é entre o microbioma do sistema digestivo humano e o microbioma da rizosfera das plantas (Mendes; Raaijmakers, 2015), ambos sistemas abertos com amplas áreas superficiais colonizadas por um imenso número de microrganismos. Embora apresentem diferenças em termos de composição da comunidade, estes dois ecossistemas apresentam similaridades nas funções dos microbiomas relacionadas à aquisição de nutrientes, à modulação do sistema imune e à proteção contra infecções por patógenos (Mendes; Raaijmakers, 2015), de maneira que se pode dizer que a rizosfera da planta pode ser vista como um sistema digestório às avessas.

As comunidades microbianas desempenham um papel fundamental no funcionamento das plantas, influenciando sua fisiologia e desenvolvimento (Rossmann et al., 2017). Sendo o solo a principal fonte de microrganismos que colonizam as plantas durante seu crescimento, os microrganismos passam pela rizosfera antes de alcançarem o hospedeiro. A rizosfera é a região do solo diretamente influenciada pelos exsudatos das plantas e onde há uma maior atividade biológica e abundância de microrganismos quando comparada com o solo. O microbioma da rizosfera é constituído por microrganismos benéficos que contribuem para o crescimento das plantas, mas também por patógenos que colonizam a rizosfera tentando romper a proteção microbiana e os mecanismos inatos de defesa da planta para causar doenças. Um terceiro grupo que pode ser encontrado na rizosfera é constituído de microrganismos potencialmente patogênicos aos seres humanos que, quando transportados no tecido da planta e consumidos por pessoas debilitadas, podem causar doenças (Mendes et al., 2013). Embora a importância do microbioma da rizosfera para a planta seja amplamente reconhecida, não se conhece a vasta maioria dos microrganismos que nela se

encontram. Assim, é fundamental ampliar nosso conhecimento sobre quais microrganismos compõem o microbioma e as funções que eles desempenham na interação com o hospedeiro (Mendes et al., 2013).

Com o objetivo de elucidar a contribuição do microbioma da rizosfera para o desenvolvimento da planta, a equipe da Embrapa Meio Ambiente conduziu ou participou de diversos estudos que ampliam o conhecimento dos mecanismos que envolvem as interações entre comunidade microbiana complexa e o hospedeiro. As premissas usadas nestes estudos foram: 1) a planta com seu microbioma constitui um superorganismo ou holobionte, de maneira que, para se entender o funcionamento da planta no ambiente, é necessário levar em conta o microbioma associado, 2) a planta pode terceirizar alguns serviços, ou seja, o microbioma supre a planta com características genéticas que ela não carrega no próprio genoma; e 3) a planta é capaz de modular parcialmente a montagem e funcionamento do microbioma na rizosfera. Desta forma, são apresentados neste capítulo os avanços em diferentes linhas de pesquisa no estudo do microbioma da rizosfera em plantas sob estresse abiótico e biótico, conduzido com a participação do Laboratório de Microbiologia Ambiental da Embrapa Meio Ambiente. Em relação ao estresse abiótico, os estudos têm ênfase em plantas sob condição de seca e no entendimento de como o microbioma contribui para a nutrição da planta ou é impactado por diferentes regimes de fertilização. Quanto ao estresse biótico, o conjunto de estudos tem o objetivo de elucidar a forma como o microbioma da rizosfera atua como uma extensão do sistema de defesa da planta para proteger o hospedeiro contra a infecção de patógenos do sistema radicular. Adicionalmente, os resultados de estudos que avaliam o impacto da domesticação e do melhoramento genético nas interações multitróficas que ocorrem no microbioma da rizosfera são apresentados. Um conjunto de estudos elucidam o impacto do melhoramento genético para resistência a doenças no microbioma da rizosfera. Finalmente, são apresentadas as perspectivas de como o avanço do conhecimento nestes temas pode ser usado em favor da planta, apontando estratégias para a manipulação do microbioma da rizosfera para uma agricultura sustentável.

## O MICROBIOMA DA RIZOSFERA SOB CONDIÇÕES DE SECA

O papel do microbioma na proteção de plantas contra os efeitos negativos impostos pela seca é de extrema importância. A exploração da diversidade do microbioma associada a ambientes áridos e semiáridos pode fornecer informações sobre mecanismos e linhagens microbianas capazes de auxiliar as plantas a se desenvolverem nesses ambientes extremos. A Caatinga, bioma inserido no semiárido brasileiro, pode ser considerada um ambiente extremo devido às elevadas temperaturas, longas e irregulares secas, baixa disponibilidade de água e elevada radiação ultravioleta (Santos et

al., 2011). Este tipo de ambiente deve comportar inúmeros microrganismos capazes de ultrapassar condições que consideradas extremas do ponto de vista humano – embora, do ponto de vista dos organismos, sejam normais.

O bioma Caatinga tem sido usado pela Embrapa Meio Ambiente para bioprospecção de microrganismos que possam ser utilizados no desenvolvimento de inoculantes agrícolas. O primeiro trabalho a reportar o potencial de bactérias obtidas deste bioma capazes de promover o crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) sob estresse hídrico foi descrito por Kavamura et al. (2013a). Bactérias associadas a diferentes espécies de cactáceas foram isoladas com base em sua capacidade de crescimento em meio de cultura com reduzida atividade de água, entre outras características, como produção de exopolissacarídeos (EPS), produção de ácido indol-3-acético (AIA), solubilização de fósforo e produção de amônia (NH<sub>3</sub>) e de biofilme (Kavamura; Melo, 2014). Duas linhagens bacterianas de *Bacillus* spp. promoveram o crescimento de milho sob estresse hídrico correspondente a 30% da capacidade de campo. O sequenciamento do genoma de uma dessas linhagens (CMAA 1363) indicou 99,6% de similaridade com a espécie *Bacillus aryabhatai* e confirmou a presença de genes envolvidos em respostas ao estresse e promoção de crescimento de plantas, podendo ser os responsáveis pela proteção fornecida às plantas contra os efeitos negativos impostos pela seca (Kavamura et al., 2017).

Por ser um ambiente sazonal, o entendimento das causas e mecanismos que estruturam as comunidades microbianas é importante, uma vez que pode fornecer informações sobre a dinâmica das comunidades e quais grupos de microrganismos são diferencialmente recrutados em determinadas condições. Estudos sobre diversidade microbiana em diferentes períodos (chuvoso e seca), nos quais foram coletadas amostras de solo rizosférico de diferentes cactáceas e leguminosas, mostrou que a disponibilidade de água é o principal fator responsável pela estruturação das comunidades bacterianas (Kavamura et al., 2013b; Lançoni et al., 2013). No período de seca, há uma redução da abundância bacteriana, provavelmente devido à seleção de microrganismos resistentes ou resilientes. Com a chuva, as populações microbianas sensíveis começam a colonizar a rizosfera, altamente influenciadas pelos fatores edáficos (Taketani et al., 2017).

As análises da diversidade bacteriana com base no sequenciamento parcial do gene 16S rRNA usando Ion Personal Genome Machine™ (Ion Torrent, Life Technologies) indicaram que o filo Actinobacteria correlacionou-se fortemente com a estação seca, enquanto amostras do período chuvoso correlacionaram-se com os filos Proteobacteria e Bacteroidetes. A proporção de sequências pertencentes ao gênero *Bacillus* foi significativamente maior no período de seca, assim como outros gêneros pertencentes ao filo Actinobacteria, podendo indicar por exemplo, sua tolerância às condições presentes no bioma Caatinga, além de um indício das potenciais funções ecoló-

gicas desempenhadas pelos microrganismos com relação à promoção de crescimento e proteção de plantas contra a dessecação (Kavamura et al. 2013b). Os principais mecanismos de adaptação às condições desfavoráveis impostas pelo estresse hídrico e outros tipos de estresse impostos pelo ambiente foram discutidos por Kavamura (2013) e englobam a tolerância a elevadas temperaturas, genes de tolerância à dessecação, produção de pigmentos para proteção contra a radiação ultravioleta (UV), produção de enzimas termoestáveis, produção de esporos e endósporos, sobrevivência em diferentes valores de pH, degradação de diversos compostos xenobióticos, tolerância à radiação e produção de osmólitos intracelulares.

Posteriormente, Kavamura et al. (2018a) sequenciaram o metagenoma rizosférico associado ao mandacaru (*Cereus jamacaru*) nos períodos chuvoso e de seca como parte do trabalho de mestrado de Ferreira (2014), e análise por meio da plataforma MG-RAST (Meyer et al., 2008) confirmou os resultados anteriores. Além disso, os autores observaram que as diferenças na composição das comunidades bacterianas nos períodos distintos podem ser atribuídas à baixa conectividade dos poros no solo, devido ao baixo conteúdo de água na seca, limitando a dispersão dos microrganismos e levando ao isolamento espacial das comunidades bacterianas. Com relação às funções potencialmente desempenhadas pelos microrganismos nos dois períodos, a presença de um número significativo de genes envolvidos no metabolismo de carbono e proteínas pode estar relacionada a sua habilidade em responder ao retorno da umidade. Por outro lado, genes associados ao metabolismo de carboidratos, ácidos orgânicos, processamento de RNA e respiração apresentaram-se significativamente mais abundantes no período de seca, indicando um alto nível de atividade microbiana, devido à necessidade de modulação do metabolismo em resposta ao estresse hídrico.

## O MICROBIOMA DA RIZOSFERA E A NUTRIÇÃO DA PLANTA

A complementação nutricional das plantas é uma das muitas funções que o microbioma pode exercer. O papel do microbioma na aquisição de nutrientes é ilustrado pela exploração das associações simbióticas de bactérias para suprimento da demanda de nitrogênio em culturas de feijoeiro (Hungria; Neves, 1986) e soja (Hungria; Araújo, 1999). O avanço das tecnologias de sequenciamento e sua popularização permitiu compreender que os serviços fornecidos pelo microbioma das plantas não acontecem sempre de forma simples e em uma única direção. O microbioma relaciona-se não somente à saúde e desenvolvimento da planta, mas é influenciado também pelas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, ou seja, direta e simultaneamente pelas condições nutricionais da planta e do solo. A alteração da saúde nutricional da planta pode influenciar o perfil de exsudados e isso levaria a uma alteração do microbioma da planta para uma outra condição dependente de outras características.

Kavamura et al. (2018b) demonstraram que a adição e o manejo a longo prazo por fertilizantes químicos provocaram impactos negativos à diversidade e riqueza bacteriana da rizosfera de trigo. O manejo com nitrogênio orgânico, no entanto, favoreceu a estrutura da comunidade bacteriana da rizosfera. Além de maior estabilidade para o microbioma rizosférico foram também observados maiores índices de diversidade e riqueza nas comunidades microbianas associadas à planta. Kavamura et al. (2018b) também observaram, por meio de predição funcional baseada em taxonomia, que a variação das funções potencialmente oferecidas pelo microbioma foi influenciada principalmente pelo estágio de crescimento da planta. Nos estádios iniciais de crescimento, foi observado um enriquecimento de funções envolvidas no metabolismo, sugerindo o início da estruturação do microbioma rizosférico ao passo que, em estádios mais avançados do desenvolvimento da planta, como na floração, foi observado o enriquecimento de funções envolvidas na degradação de compostos mais complexos, indicando a alteração do perfil de exsudatos das plantas.

Em condições de limitação de nitrogênio, as funções envolvidas no metabolismo de terpenóides e policetídeos foram enriquecidas (Kavamura et al., 2018b). Esses compostos, inibidores de nitrificação, são exsudados pelas plantas nessas condições nutricionais (Coskun et al., 2017). Isso reforça a ideia de que, em solos com baixo conteúdo nutricional, as plantas recorrem às associações com o microbioma para favorecer seu crescimento, atuando na retenção, aquisição, solubilização ou mobilização de nutrientes do solo.

Depois do nitrogênio, o fósforo é o segundo elemento mais consumido pelas plantas. Porém, ao contrário do primeiro, este não pode ser obtido da atmosfera e é considerado um recurso não renovável. No Brasil, como em outras regiões tropicais, os solos apresentam baixo pH e alto teor de argila que fixam rapidamente o fósforo após fertilização, tornando o nutriente indisponível para as plantas. Este fenômeno é responsável por limitar a produção de diversas culturas em condições tropicais. Ao estudar o microbioma rizosférico de dois cultivares de feijoeiro contrastantes em relação à eficiência na aquisição e uso de fósforo, Chiaramonte (2018) verificou que, em condições em que o fósforo é limitante, o genótipo de feijão menos eficiente é capaz de recrutar um microbioma que apresenta muito mais funções envolvidas no metabolismo do fósforo quando comparado ao genótipo eficiente em relação a sua aquisição. Em geral, a suplementação com fósforo, independente da natureza do nutriente utilizado (solúvel ou insolúvel), provocou no microbioma da rizosfera uma redução das funções envolvidas no metabolismo do nutriente.

Chiaramonte (2018) também demonstrou um enriquecimento diferencial de vários membros do microbioma (i.e., Unidades Taxonômicas Operacionais) observados na rizosfera do genótipo de feijão ineficiente em relação ao uso do fósforo quando cultivado em condições limitantes deste nutriente. Este aumento de abundância de membros

específicos do microbioma estava associado ao enriquecimento de funções de quimiotaxia bacteriana e funções envolvidas na mobilização de fósforo, o que sugere que esse genótipo tem uma maior comunicação com o microbioma rizosférico e é altamente dependente deste para a mobilização de fósforo. Esse estudo permitiu observar a importância das características fisiológicas do genótipo no recrutamento do microbioma associado e, assim como o estudo de Kavamura et al. (2018b), apresentou evidências de que o recrutamento do microbioma rizosférico, independente de taxonomia, pode estar relacionado principalmente às funções do metabolismo de nutrientes disponíveis no microbioma e às necessidades nutricionais da planta hospedeira.

Ainda não foi possível determinar o microbioma mínimo envolvido na nutrição vegetal das plantas. Os estudos de Kavamura et al. (2018b) e Chiaramonte (2018) apontam para a necessidade nutricional das plantas e o conteúdo e qualidade dos nutrientes do solo como direcionadores de uma microbiota para suprir a demanda das plantas, ainda que existam diferenças taxonômicas entre as situações estudadas. No entanto, existe a possibilidade de que o microbioma rizosférico possa ser manipulado ou transferido a fim de aumentar a demanda de nutrientes das culturas. Em um estudo subsequente, Chiaramonte (2018) avaliou o efeito do microbioma do genótipo ineficiente de feijoeiro no desenvolvimento da planta eficiente. Para isso, a rizosfera das plantas do genótipo menos eficiente, que haviam demonstrado enriquecimento de funções relacionadas ao metabolismo do fósforo, foi utilizada para o cultivo do genótipo eficiente. Os resultados mostraram que o genótipo mais eficiente na aquisição de fósforo respondeu positivamente à rizosfera modificada nos estádios iniciais de crescimento, ou seja, o microbioma foi selecionado e enriquecido pelo genótipo ineficiente na aquisição de fósforo do solo. Estudos adicionais estão sendo planejados para se investigar mais profundamente o efeito do transplante de microbiomas nestas condições. Coletivamente, os estudos de Kavamura et al. (2018b) e Chiaramonte (2018) corroboram que as plantas dependem, pelo menos parcialmente, do microbioma da rizosfera para sua nutrição e que a exploração dessa comunidade poderia levar a um manejo mais eficiente, conduzindo a uma agricultura sustentável.

No entanto, ainda hoje, a forma mais simples de aplicar os conhecimentos obtidos sobre o papel do microbioma vegetal na nutrição das plantas é a prática tradicional que consiste na inoculação de sementes e/ou solo com um ou mais microrganismos reconhecidos pelo seu papel benéfico para as plantas e não de uma comunidade completa e estabelecida. Embora a ênfase do estudo do uso de inoculantes na agricultura tenha sido o efeito no fenótipo da planta, é importante notar que a introdução de inoculantes no ambiente rizosférico tem um impacto na composição e funcionalidade do microbioma da rizosfera.

Godoy (2020) isolou, caracterizou e selecionou bactérias da rizosfera de cultivares de trigo, usando sequenciamento do gene 16S rRNA e testes bioquímicos para

a produção de AIA, solubilização de fosfato, fixação de nitrogênio e antagonismo contra fungos patógenos de doenças de solo. Além de estimar a contribuição destes microrganismos selecionados para a promoção de crescimento de trigo em casa de vegetação, Godoy (2020) avaliou o impacto da inoculação na comunidade bacteriana da rizosfera. Além do tratamento na semente, foram realizadas inoculações quinzenais e amostragens de solo rizosférico ao longo de todo o experimento, antes e depois de cada inoculação bacteriana. A análise multivariada permutacional dos dados de 16S rRNA das amostras de solo indicou que existe uma alteração significativa na estrutura da comunidade bacteriana da rizosfera ao longo do desenvolvimento da planta que também é impactada pela inoculação. Os resultados apontaram que o inoculante se estabelece mais facilmente nos primeiros estádios de desenvolvimento da planta hospedeira e sua abundância relativa diminui gradualmente dias após a inoculação, sugerindo que, embora o inoculante tenha um efeito positivo no desenvolvimento e proteção da planta, o microbioma da rizosfera exerce um forte poder tampão no equilíbrio da comunidade microbiana, reduzindo rapidamente os níveis do inoculante na rizosfera da planta.

Em um estudo conduzido por Bononi (2020), foi avaliado o efeito da inoculação do fungo *Trichoderma* no microbioma da rizosfera de soja. Esse gênero de fungo filamentoso abriga um dos principais grupos de microrganismos usados para promover a produção e desenvolvimento de diversas espécies de cultura devido a sua associação simbiótica com as plantas e seu potencial de controlar patógenos de solo. A inoculação de um consórcio de fungos do gênero *Trichoderma* em soja cultivada em casa de vegetação não causou alterações na estrutura do microbioma bacteriano em rizosfera de soja verificado pelo sequenciamento do gene 16S rRNA. Porém, ocorreu um aumento significativo no número de funções preditas envolvidas no metabolismo do fósforo, sobretudo de proteínas de ligação e transporte de fósforo e fosfatases, além da solubilização de fósforo realizada pelos próprios fungos (Bononi, 2020).

## O MICROBIOMA DA RIZOSFERA COMO EXTENSÃO DO SISTEMA DE DEFESA DA PLANTA

A capacidade do solo de inibir as doenças da rizosfera é uma característica comum de solos saudáveis e é determinada pelos fatores associados ao solo (processos químicos e físicos) e aos fatores associados ao microbioma (processos biológicos) da rizosfera. O impacto do microbioma da rizosfera na defesa das plantas é mais bem exemplificado em solos supressivos. Um solo é conhecido por ser supressivo quando as plantas não são acometidas por certas doenças ou quando a gravidade da doença é substancialmente reduzida mesmo que o agente patogênico esteja presente e a

planta seja suscetível à doença (Mendes et al., 2011). Assim, três elementos centrais são definidos para que esse evento ocorra: 1) presença de um patógeno do solo; 2) um hospedeiro suscetível; e 3) um surto da doença através de cultivos consecutivos. Os solos supressivos começaram a ser investigados no passado quando esse fenômeno foi notado após um surto da doença em áreas de monocultivo. Esse fato é explicado pelas mudanças na composição do microbioma da rizosfera, onde grupos de microrganismos específicos são enriquecidos com habilidades de proteção do sistema radicular da planta. Vários estudos revelaram que as plantas respondem ao ataque do patógeno produzindo compostos químicos que atraem um conjunto de microrganismos benéficos, resultando em proteção. Isso significa que o sucesso de um patógeno em causar doença é influenciado pela comunidade microbiana do solo no momento em que a infecção ocorre. Em outras palavras, esse evento demonstra que a planta depende de uma porção crucial do microbioma da rizosfera como uma primeira linha de defesa contra a invasão de patógenos do solo (Mendes et al., 2011).

Contudo, todo solo natural tem a capacidade de suprimir um patógeno até certo ponto. Isso pode ser observado a partir da severidade de uma doença acompanhada de inoculações de um patógeno em um solo pasteurizado comparado a um solo não pasteurizado. Esse evento é conhecido como supressão geral, que se baseia em interações multitróficas e está relacionada à atividade microbiana total, sendo comparado ao sistema imune inato do homem (Raaijmakers; Mazzola, 2016). Por exemplo, nesse caso, a comunidade microbiana compete com o patógeno por recursos ou causa inibição por formas mais diretas de antagonismo. Além disso, pode ser modulada por práticas de manejo do solo que estimulam a atividade microbiana. Por outro lado, a supressividade específica é basicamente direcionada à atividade de um grupo específico de microrganismos antagonísticos a um patógeno específico do solo. A natureza biótica da supressividade específica é demonstrada através da transferência de um solo para outro e pode ser eliminada por esterilização, pasteurização ou irradiação do solo. Desse modo, a supressividade específica é distinguida da supressividade geral porque pode ser transferida para solos não supressivos (conducentes) adicionando 0,1%–10% do solo supressivo. Para doenças fúngicas transmitidas pelo solo, a supressividade específica normalmente se desenvolve após elevados níveis de doença na área de cultivo. Portanto, nesse caso, o microbioma requer tempo para reagir à infecção do patógeno, sendo esse processo comparado ao sistema imune adaptativo do corpo humano (Raaijmakers; Mazzola, 2016). Desse modo, as interações entre patógeno, planta e o microbioma da rizosfera são elementos chave para desencadear a supressividade específica da doença.

Este fenômeno intrigante tem sido observado para vários sistemas de cultivo envolvendo patógenos de solo, incluindo fungos como *Gaeumannomyces graminis* var *tritici*, *Fusarium oxysporum* e *Rhizoctonia solani* (Klein et al., 2013; Mendes et al., 2011;

Raaijmakers; Weller, 1998). A supressão de doenças de plantas recebeu maior atenção com os recentes avanços em abordagens independentes de cultura, que permitiram aprofundar o conhecimento sobre o microbioma de plantas. Assim, foi possível explorar a diversidade dessas comunidades, incluindo seu impacto na saúde das plantas e os fatores ecológicos que estão associados a este fenômeno. Hoje é conhecido que os solos supressivos a *R. solani*, patógeno fúngico da beterraba-sacarina, quando misturados com os solos propícios à doença na proporção de 1:9 (p/p), podem suprimir com sucesso a infecção do fungo (Mendes et al., 2011). Neste estudo, os principais filos bacterianos encontrados na rizosfera de solos supressivos foram Proteobacteria, Firmicutes e Actinobacteria, especialmente durante a infecção do patógeno, indicando que as plantas podem explorar um consórcio microbiano para proteção da rizosfera contra patógenos do solo (Mendes et al., 2011). Intrigantemente, a indução de supressividade do solo pode ocorrer naturalmente, uma vez que a maioria das espécies de plantas em monocultivo levarão a um acúmulo de fitopatógenos especializados, assim como a antagonistas residentes no ambiente. Por isso, o solo e o genótipo da planta estão entre os principais determinantes da montagem do microbioma da rizosfera. Isso indica que a dinâmica da doença conta com características genéticas do hospedeiro para recrutar grupos específicos de microrganismos do solo em plantios consecutivos que protegem as raízes das plantas. Essa abordagem nos permite entender como a monocultura impulsionada por um hospedeiro específico pode, ao longo do tempo, recrutar uma comunidade antagonista com capacidade de proteção do sistema radicular (Faria, 2020). No entanto, os efeitos dos genótipos na composição das comunidades da rizosfera são altamente complexos e dinâmicos. Nossa compreensão de como as plantas moldam o conjunto de microrganismos da rizosfera ainda é parcial.

Essa influência na composição e ativação do microbioma da rizosfera pela planta ocorre por meio da exsudação de compostos que podem estimular ou inibir o crescimento de microrganismos na rizosfera. Ao mesmo tempo, o fungo patogênico que habita o solo também é estimulado pelos exsudatos radiculares e compete com outros microrganismos por nutrientes e espaço. Porém, a comunidade benéfica recrutada pela rizosfera da planta limita o sucesso do patógeno por meio da produção de compostos ou ativação de funções relacionadas ao estresse oxidativo (Chapelle et al., 2015). Por isso, a presença do patógeno é percebida pela rizosfera, que responde à infecção acionando o microbioma por meio do enriquecimento de grupos bacterianos específicos. Esses grupos de microrganismos ativam funções que resultam em uma resposta ao estresse, como, por exemplo, a produção de compostos antimicrobianos que blindam o sistema radicular, impedindo a invasão do patógeno (Chapelle et al., 2015). O entendimento dessa proteção natural do sistema radicular das plantas pode conduzir a estratégias de manejo ou manipulação do microbioma que resultem na redução da necessidade do uso de produtos químicos em sistemas de produção. Em um estudo

posterior, foi avaliado o possível papel do microbioma da endosfera na proteção contra doenças de solo. Supondo que o patógeno tenha sucesso em atravessar a primeira linha microbiológica de defesa, i.e., o microbioma da rizosfera, ele alcança o tecido radicular, ativando o sistema de defesa da planta – porém, ao alcançar o interior desses tecidos, o patógeno encontra o microbioma da endosfera. Durante a infecção pelo patógeno, membros do microbioma também são enriquecidos na parte interna das raízes, fornecendo importantes mecanismos de defesa, e atuam como a segunda camada microbiológica de defesa da planta (Carrión et al., 2019). A inoculação de mudas de beterraba-sacarina com *R. solani* cultivadas em solo supressivo enriqueceu, na endosfera das raízes, duas famílias bacterianas importantes no processo de defesa da planta: *Chitinophagaceae* e *Flavobacteriaceae*. As análises revelaram que essas famílias atuam com um conjunto de enzimas quitinase que estão diretamente relacionadas à redução de danos nas raízes de beterraba, impedindo assim o progresso da infecção do fungo (Carrión et al., 2019). Neste contexto, o sucesso da invasão do patógeno não depende apenas da planta hospedeira e da influência do ambiente, mas também da complexidade das comunidades microbianas do solo, da rizosfera, da endosfera e da interação ecológica entre todos esses fatores.

A estratégia adaptativa do solo (supressividade específica) não beneficia apenas a planta que está sob ataque, mas também os plantios subsequentes da cultura. É por isso que essas respostas de *feedback* são às vezes referidas como efeitos de “legado” ou “memória do solo” (Raaijmakers; Mazzola, 2016). Assim, embora esse estado de supressividade específica do solo seja sensível às práticas de manejo, esse cenário pode ser rapidamente recuperado na presença da planta hospedeira original e do patógeno indutor (Raaijmakers; Mazzola, 2016). Para entender como distúrbios ambientais podem afetar solos supressivos, van der Voort et al. (2016) testaram o impacto do calor na remontagem de comunidades bacterianas no microbioma da rizosfera de solos supressivos. Após o distúrbio ocorrido por exposição a altas temperaturas (50 °C e 80 °C por 1 h), houve aumento na diversidade da comunidade de rizobactérias, conduzindo a perda parcial ou completa da proteção da doença. A perda da proteção foi uma consequência da redução na abundância de famílias bacterianas como *Streptomycetaceae*, *Micrococcaceae* e *Mycobacteriaceae*, sugerindo que o filo Actinobacteria contribui para a supressividade de doenças de solo. Com os resultados observados, foi proposto um modelo de remontagem das comunidades bacterianas na rizosfera, no qual as famílias de bactérias tolerantes ao calor e com crescimento rápido aumentam significativamente em abundância relativa após o tratamento térmico, enquanto bactérias sensíveis à temperatura e de crescimento lento apresentam uma desvantagem, resultando no rearranjo das comunidades de rizobactérias – que, por sua vez, impactam negativamente o serviço ecossistêmico de supressão da doença (van der Voort et al., 2016). A adaptabilidade dos microrganismos no solo após um distúrbio é crucial

para entender o equilíbrio ecológico e a diversidade microbiana, a qual possibilita a homeostase do solo após um estresse biótico ou abiótico.

## IMPACTO DA DOMESTICAÇÃO DAS PLANTAS NA MONTAGEM DO MICROBIOMA DA RIZOSFERA

O processo de domesticação e o posterior melhoramento genético de plantas contribuíram consideravelmente para a civilização humana, sustentando o crescimento da população mundial. Porém, ao longo do tempo, esses processos também contribuíram para a redução da diversidade genética nos materiais que resultaram nas cultivares modernas, sendo acompanhada pelas mudanças na arquitetura das plantas, no meio ambiente e nas práticas de manejo. Apenas nos últimos anos estudos têm buscado entender como essa diversidade genética reduzida, associada às mudanças nos exsudatos radiculares e na arquitetura das raízes, afetou a montagem e as funções do microbioma da rizosfera, bem como as interações desse microbioma com a planta.

Neste contexto, Flores (2015) direcionou sua pesquisa ao estudo do microbioma rizosférico de dois genótipos de feijão comum (*Phaseolus vulgaris*), um selvagem e outro cultivado, a fim de determinar a composição e funcionalidade do microbioma de cada rizosfera e verificar se materiais ancestrais têm maior capacidade de hospedar microrganismos benéficos na rizosfera do que cultivares modernas. Em relação à composição, o estudo revelou que os filos bacterianos Acidobacteria, Verrucomicrobia, Gemmatimonadetes e o filo fúngico Glomeromycota foram mais abundantes na rizosfera do genótipo selvagem, enquanto os filos bacterianos Firmicutes, Planctomycetes, Deinococcus-thermus e o filo fúngico Ascomycota foram mais abundantes na rizosfera do genótipo cultivado. Sobre a funcionalidade do microbioma, o genótipo selvagem de feijão foi capaz de recrutar um número maior de organismos e funções benéficas na rizosfera quando comparado à variedade comercial, sugerindo que o material selvagem tem uma maior capacidade de comunicação com o microbioma da rizosfera. Dessa forma, os autores concluíram que os processos de domesticação e melhoramento genético das plantas cultivadas potencialmente reduziram a capacidade do hospedeiro em selecionar e sustentar microrganismos e funções benéficas na rizosfera.

Pérez-Jaramillo et al. (2016) propuseram a estrutura de trabalho *back to the roots* (“de volta às raízes”). Essa estrutura baseou-se na ideia de que as plantas coevoluíram com a comunidade microbiana de solos nativos, realizando uma seleção ativa de microrganismos com efeitos benéficos no crescimento e na saúde das plantas. Além disso, a abordagem *back to the roots* propôs a exploração do microbioma de plantas sil-

vestres e seus habitats nativos para a identificação de plantas e características microbianas com o objetivo final de restabelecer associações benéficas que podem ter sido prejudicadas durante a domesticação da planta. O fluxo de trabalho proposto inclui:

1. Conhecer a história evolutiva e o processo de domesticação da planta hospedeira para fazer uma seleção adequada de materiais vegetais silvestres, bem como de variedades locais e cultivares modernas; conhecer o centro de origem e os centros de diversificação, permitindo a coleta de solos nativos e seu uso na configuração experimental, além de fornecer a comunidade microbiana nativa na qual os parentes selvagens presumivelmente recrutam e sustentam um microbioma mais benéfico em comparação com cultivares tradicionais menos competentes e modernas.
2. Utilizar metagenômica e metatranscriptômica em conjunto com abordagens dependentes de cultura para identificar mudanças na diversidade taxonômica e funcional dos microbiomas dos diferentes genótipos de plantas.
3. Utilizar uma estratégia de genotipagem de plantas, mapeamento de *Quantitative Trait Loci* (QTL) e estudos de associação do genoma (*Genome Wide Association Studies* – GWAS) com parentes selvagens, variedades locais, cultivares modernos e, preferencialmente, cruzamentos entre os genótipos para identificar regiões específicas no genoma onde as características de recrutamento estão localizadas.

Considerando o fluxo de trabalho descrito acima, Pérez-Jaramillo et al. (2017) avaliaram o parentesco genético, os traços fenotípicos das raízes e a composição da comunidade rizobacteriana de acessos modernos e selvagens de feijão comum cultivado em solo agrícola do planalto da Colômbia – um dos centros de diversificação dessa cultura. O estudo revelou diferenças genéticas e arquitetonias de raízes entre acessos selvagens e modernos, com o comprimento específico de raiz maior para os acessos selvagens. Além disso, houve divergência na composição da comunidade de rizobactérias entre acessos de feijão selvagem e moderno, associada às diferenças no comprimento específico da raiz. Ao longo da trajetória genotípica do feijão, passando de selvagem para moderno, foi observada também uma diminuição gradual na abundância relativa de Bacteroidetes, principalmente *Chitinophagaceae* e *Cytophagaceae*, e um aumento na abundância relativa de Actinobacteria e Proteobacteria, em particular *Nocardioideae* e *Rhizobiaceae*, respectivamente. A divergência na composição da comunidade de rizobactérias descrita entre acessos de feijão selvagem e moderno sugeriu uma base genética vegetal na montagem do microbioma da rizosfera.

Dando continuidade aos estudos, Pérez-Jaramillo et al. (2019) investigaram se a transição do solo nativo para um solo agrícola afetou a comunidade de rizobactérias de acessos modernos e selvagens de feijão comum e se isso levou ao esgotamento da

diversidade de rizobactérias. O estudo mostrou que a transição do feijoeiro de um solo nativo para um solo agrícola levou a um ganho de diversidade de rizobactérias e revelou um microbioma central pouco diverso, mas altamente abundante, que se assemelha ao de outras espécies de plantas, sugerindo uma homogeneização da diversidade de rizobactérias de plantas cultivadas em diferentes cenários agrícolas. A estrutura da rede (network) foi mais simples em solo agrícola em comparação com solo nativo, o que novamente pode refletir o processo de homogeneização biótica. Vários gêneros bacterianos foram encontrados exclusivamente no solo nativo e como membros exclusivos da rizosfera de acessos de feijão selvagem. Esses gêneros bacterianos eram membros pouco abundantes da comunidade de rizobactérias. Por outro lado, o número de táxons bacterianos encontrados exclusivamente no solo agrícola foi consideravelmente maior. A proporção de gêneros bacterianos esgotados parece estar supercompensada no solo agrícola pelo número de “microrganismos adquiridos”, muitos dos quais abundantes na rizosfera de todos os acessos de feijão estudados.

Apesar da maioria dos estudos de microbioma de planta focar apenas em comunidades bacterianas e fúngicas, o microbioma da rizosfera suporta redes alimentares microbianas mais amplas com organismos abrangendo diferentes níveis tróficos. Em vista disso, Rossmann et al. (2020) incluíram em seu estudo o filo Cercozoa como representante de um nível trófico superior e avaliaram a diversidade de comunidades de bactérias, fungos e cercozoários em variedades tradicionais e modernas de trigo (*Triticum aestivum*). Os autores investigaram as correlações entre a estrutura do microbioma e o genótipo da planta a fim de começar a entender a contribuição de grupos tróficos superiores na montagem do microbioma na rizosfera do trigo. Esse estudo revelou que os táxons dominantes foram os filos bacterianos Proteobacteria, Actinobacteria e Acidobacteria; os filos fúngicos Ascomycota, Chytridiomycota e Basidiomycota; e as classes de cercozoários *Sarcomonadea*, *Thecofilosea* e *Imbricatea*. As redes microbianas das variedades tradicionais do trigo formam uma topologia de rede mais emaranhada e complexa do que a dos cultivares de trigo modernos, sugerindo que estes – resultantes do processo de melhoramento genético – perderam algumas das características necessárias para recrutar e manter uma microbiota de raiz específica quando comparados a seus parentes mais antigos. A alta conexão de certos táxons de cercozoários com bactérias e fungos indicou hierarquias de rede trófica onde certos predadores ganham predominância sobre outros. Correlações positivas entre protistas e bactérias em variedades tradicionais foram preservadas como um subconjunto em cultivares, como foi o caso da classe *Sarcomonadea* com o filo Actinobacteria. As correlações observadas entre a estrutura do microbioma e o genótipo da planta sugeriram a importância do controle de cima para baixo por organismos de níveis tróficos mais elevados como um fator chave para o entendimento das causas da montagem da comunidade de microbioma na rizosfera.

Estudos como os descritos contribuem para um entendimento completo e abrangente da domesticação e do melhoramento genético de plantas, incluindo as mudanças no microbioma da rizosfera. Informações como as apresentadas podem guiar as abordagens recentes para a preservação ou o resgate de interações benéficas entre as plantas e seu microbioma do solo a fim de promover uma agricultura mais sustentável.

## IMPACTO DO MELHORAMENTO GENÉTICO PARA RESISTÊNCIA A DOENÇAS NO MICROBIOMA DA RIZOSFERA

O microbioma da rizosfera coevoluiu com seus hospedeiros por milhares de anos, selecionando grupos microbianos mutualistas e comensais, mas também patógenos (Levy et al., 2018). Em condições naturais, as plantas dependem do seu microbioma para o crescimento e saúde, promovidos por meio de hormônios vegetais, disponibilização de nutrientes e inibição de patógenos causadores de doenças. Distintas espécies de plantas influenciam de formas distintas a composição e a atividade das comunidades microbianas associadas às raízes. Diferenças na morfologia das raízes, assim como o tipo e a abundância de rizodepósitos, contribuem para o efeito de seleção específico de espécies. Os microrganismos como bactérias e fungos são, em sua maioria, benéficos, podendo estar associados às plantas ou a partes delas, com relação temporária ou duradoura, sem causar danos. Porém, microrganismos oportunistas e patogênicos podem infectar as plantas e causar doenças. Os metabólitos específicos exsudados pelas raízes geram múltiplas respostas em diferentes grupos de microrganismos do solo – por exemplo, os flavonoides podem atrair não apenas simbiontes, como o *Bradyrhizobium japonicum*, mas também patógenos como o *Phytophthora sojae*. As doenças ocasionadas por fungos e bactérias estão entre os principais problemas fitossanitários, provocando perdas significativas pela destruição parcial ou total da planta. Em ecossistemas agrícolas, o manejo do solo é responsável por mudanças significativas na estrutura das comunidades microbianas. A remoção da cobertura vegetal natural e a adição de insumos para o preparo do solo podem levar à redução da diversidade microbiana e à perda de importantes funções ecológicas. Esse desequilíbrio pode acarretar o aumento da abundância de populações patogênicas, promovendo a ocorrência de doenças vasculares e radiculares. Por exemplo, a fertilização por nitrogênio e fósforo favorece fungos patogênicos em detrimento de organismos mutualísticos (Lekberg et al., 2021). Neste contexto, o microbioma da rizosfera desempenha um papel fundamental na proteção da planta contra a invasão de organismos patogênicos, sendo considerado a primeira linha de defesa das plantas.

O microbioma da rizosfera é o resultado de uma série de eventos hierárquicos, sendo o solo o reservatório inicial de espécies microbianas que, juntamente com as propriedades físicas e químicas e os processos biogeoquímicos, estruturam a comuni-

dade microbiana. Além disso, as diferentes espécies vegetais e até mesmo diferentes cultivares afetam a composição das comunidades rizosféricas por meio dos diferentes perfis de exsudação; também as vias e mecanismos de defesa das plantas têm influência na estruturação do microbioma da rizosfera (Lebeis et al., 2015). Estudos recentes têm revelado que o melhoramento genético para a resistência a doenças também afeta a composição do microbioma da rizosfera (Mendes et al., 2018ab, 2019). Alguns organismos da rizosfera são capazes de prevenir efeitos deletérios promovidos pelos patógenos por meio da produção de compostos antimicrobianos ou pela indução sistêmica da resistência nas plantas.

Por décadas, os melhoristas vegetais exploraram as características genéticas para melhorar o crescimento, o desenvolvimento, a produtividade e a resistência das plantas aos estresses bióticos e abióticos. Porém, ainda não haviam levado em consideração seus efeitos no microbioma da rizosfera das plantas. Estudos realizados com cultivares de feijão resistente ao patógeno de solo *F. oxysporum* mostraram que o melhoramento genético para a resistência ao fungo cosselecionou características da planta que impactaram a estruturação do microbioma da rizosfera (Mendes et al., 2018a, 2018b). Em comparação com cultivares suscetíveis ao *Fusarium*, a pesquisa revelou que o cultivar resistente selecionou uma comunidade diferente, mais abundante e mais diversa, em sua rizosfera, como também enriqueceu grupos bacterianos específicos que desempenham atividades antifúngicas, protegendo a planta da infecção pelo patógeno (Mendes et al., 2018a). Mais especificamente, os resultados mostraram um aumento na abundância das bactérias *Pseudomonas*, *Bacillus* e *Paenibacillus*, que atuam diretamente na supressão do *F. oxysporum*. Também foi observado um enriquecimento de genes que produzem compostos antifúngicos como fenazina, colicina V e ramnolipídios (Mendes et al., 2018b). O melhoramento para a resistência ao patógeno também afetou a fisiologia do microbioma da rizosfera, com as comunidades microbianas apresentando um maior metabolismo de nutrientes e maior expressão de genes relacionados aos ciclos do nitrogênio, fósforo e ferro (Mendes et al., 2019). Em resumo, esses resultados mostram que o melhoramento genético para a resistência ao patógeno modulou a seleção e a atividade do microbioma da rizosfera, promovendo maior abundância de bactérias que promovem complementação na proteção contra infecções fúngicas na raiz da planta.

Embora os estudos acima citados mostrem uma seleção benéfica do microbioma da rizosfera como consequência do melhoramento genético, outras pesquisas sugerem que este pode afetar a habilidade da planta em recrutar e sustentar uma comunidade benéfica. Por exemplo, Kavamura et al. (2020) estudaram o efeito ocasionado pelo melhoramento genético nas características das raízes e nas comunidades microbianas da rizosfera, comparando oito cultivares de trigo, que variam de plantas altas a semi-anãs, cultivadas em campo. O desenvolvimento de cultivares de trigo anão, com-

binados com altos níveis de insumos agroquímicos, resultou em sistemas de cultivo de alto rendimento. Os resultados mostram que as comunidades bacterianas da rizosfera de cultivares altas foram distintas daquelas associadas a cultivares semi-anãs, com maior abundância diferencial de bactérias pertencentes aos filos Actinobacteria, Bacteroidetes e Proteobacteria em cultivares altas, em comparação com uma maior abundância diferencial de Verrucomicrobia, Planctomycetes e Acidobacteria em cultivares semi-anãs. As funções microbianas e a interação entre os microrganismos na rizosfera também foram afetadas. Em suma, os resultados mostraram que o melhoramento genético para o desenvolvimento de plantas semi-anãs pode ter afetado a capacidade das plantas de recrutar e sustentar uma complexa rede de comunidade bacteriana na rizosfera, perdendo funções importantes que auxiliam a planta no crescimento e saúde. Por exemplo, o melhoramento pode ter reduzido a quantidade de espécies-chave conhecidas por seu potencial de antagonizar patógenos, possivelmente afetando o grau de resistência dos cultivares semi-anões a doenças específicas.

Nos últimos anos, tem crescido o interesse em pesquisas focadas na modificação de características das plantas por meio do melhoramento genético para alterar sua capacidade de interagir com microrganismos benéficos. Porém, a maioria dos programas de melhoramento de plantas inadvertidamente desconsiderou seu microbioma. Um melhor entendimento dos fatores que levam à seleção e montagem do microbioma da rizosfera e à manipulação de sua composição e estrutura é uma estratégia promissora para promover resistência contra muitos estresses bióticos e abióticos para uma ampla variedade de hospedeiros, exigindo menos tempo do que os programas de reprodução (Chiaramonte et al., 2020). Porém, a relação entre genes específicos da planta e a composição da rizosfera ainda é pouco elucidada. Embora existam exemplos de recrutamento de características microbianas benéficas na rizosfera de cultivares de plantas geneticamente melhoradas, o mecanismo por trás desse processo de seleção permanece desconhecido. O avanço em pesquisas que tentam desvendar a relação genética da planta com o microbioma da rizosfera fornecerá informações que ajudarão futuros programas de melhoramento na busca por interações planta-microrganismos benéficas em sistemas de cultivo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A agricultura intensiva moderna requer grandes quantidades de fertilizantes e pesticidas para sustentar altas produtividades e evitar perdas causadas por infecções por patógenos. O manejo biológico e a exploração do microbioma representam estratégias promissoras para amenizar o impacto de estresses abióticos e proteger as plantas de patógenos de forma sustentável. O conjunto de estudos apresentado neste capítulo ilustra a importância do microbioma do solo e da rizosfera para a nutrição

da planta, para o enfrentamento da seca e no processo de defesa natural das plantas contra doenças que têm origem no solo. Para um maior entendimento dos fatores que modulam as comunidades microbianas e exploração dos potenciais serviços ambientais oferecidos pelo microbioma da rizosfera, há a necessidade de uma transição da abordagem tradicional baseada apenas no uso de microrganismos isolados para uma integração de outras ferramentas “ômicas” complementares, como sugerido por Kavamura et al. (2021), contribuindo, assim, para o início do uso de uma abordagem baseada no manejo do microbioma. Esta quebra de paradigma só pode ser alcançada com o avanço no conhecimento dos mecanismos que governam as interações entre a planta hospedeira e o complexo conjunto de microrganismos da rizosfera. Por isso, o conceito para a exploração das similaridades entre reinos diferentes no que se refere à interação do hospedeiro com seu microbioma associado foi proposto anteriormente por Mendes e Raaijmakers (2015). Esta abordagem, associada à adoção da teoria ecológica, combinada com modelagem e uso de comunidades microbianas sintéticas, é promissora para identificar características genéticas e vias metabólicas no hospedeiro envolvidas na montagem de um microbioma benéfico na rizosfera (Mendes; Raaijmakers, 2015). Posteriormente, este conceito foi amplificado para um contexto ecológico, o qual é compartilhado pelo hospedeiro e por seus microbiomas associados além das barreiras de seus respectivos reinos (Berg et al., 2015).

De maneira geral, práticas tradicionais conservacionistas e de manejo do solo são abordagens que podem favorecer seu equilíbrio biológico. Tais práticas de manejo proporcionam diversidade no sistema e equilíbrio de funções entre planta, solo e microrganismos. Porém, uma abordagem mais refinada implicaria entender e manipular funções específicas do microbioma presentes no sistema. A elucidação da regulação e expressão de genes através das vias biossintéticas pode resultar em estratégias para estimular, por exemplo, a mobilização de fósforo para nutrir a planta, a produção de determinado antibiótico para evitar infecções ou a produção de exopolissacarídeos para mitigar o efeito de déficit hídrico. Tal fato permitiria a manipulação de funções microbianas relevantes através de sinalização de moléculas que desencadeiem a produção de determinado composto dentro do sistema solo (Faria et al., 2020).

Finalmente, é proposta uma abordagem de ajuste biológico abrangente dos sistemas de produção classificada em três níveis, como ilustrado na Figura 19.1.

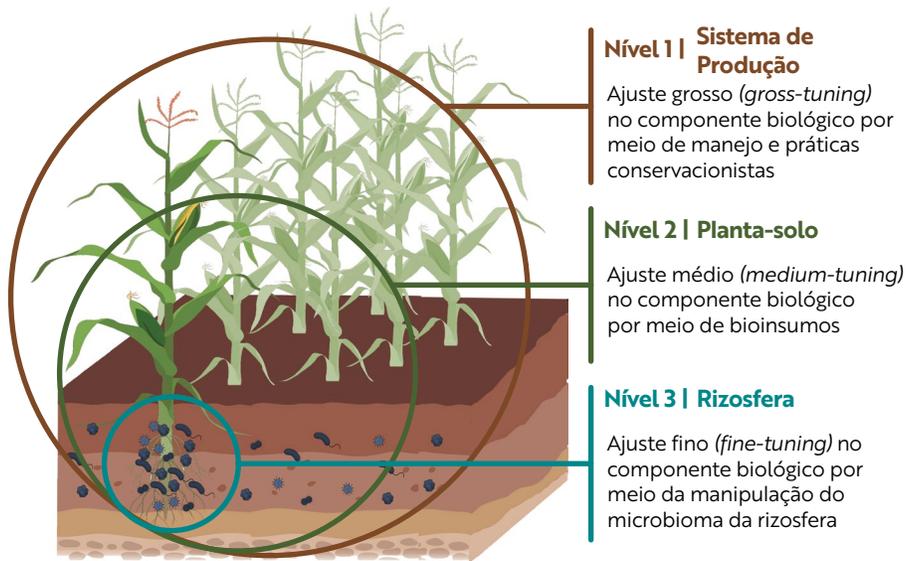


Figura 19.1. Níveis de abordagens para o ajuste no componente biológico de sistemas de produção. Crédito: elaborada pelos autores

Os níveis são descritos como:

- Nível 1 – Sistema de produção: “ajuste grosso” (*gross-tuning*) no componente biológico incluindo as práticas tradicionais de manejo, como sistema de plantio direto, cultivo orgânico, rotação de culturas, aumento de diversidade de plantas no cultivo entre linhas e adubação verde.
- Nível 2 – Planta-solo: “ajuste médio” (*medium-tuning*) no componente biológico, incluindo o uso de bioinsumos, como agentes de controle biológico, inoculantes, biofertilizantes e condicionadores de solo.
- Nível 3 – Rizosfera: “ajuste fino” (*fine-tuning*) no componente biológico, incluindo a exploração de funções específicas do microbioma da rizosfera. Neste caso, os ajustes em todos os níveis devem ser buscados em conjunto, permitindo a exploração máxima da dimensão biológica do solo, integrada às propriedades físico-químicas, na busca por uma agricultura mais sustentável.

## REFERÊNCIAS

- BERG, G.; KRAUSE, R.; MENDES, R. Cross-kingdom similarities in microbiome ecology and biocontrol of pathogens. *Frontiers in Microbiology*, v. 6, p. 1, 2015.
- BONONI, L. **Bioprospecção de *Trichoderma* spp. envolvidas na solubilização de fosfato e no controle biológico de *Sclerotinia sclerotium* em soja.** 2020. 135 f. Tese (Doutorado em Agronomia Microbiologia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- CARRIÓN, V. J.; PÉREZ-JARAMILLO, J.; CORDOVEZ, V.; TRACANNA, V.; DE HOLLANDER, M.; RUIZ-BUCK, D.; MENDES, L. W.; VAN IJCKEN, W. F. J.; GOMEZ-EXPOSITO, R.; ELSAYED, S. S.; MOHANRAJU, P.; ARIFAH, A.; VAN DER OOST, J.; PAULSON, J. N.; MENDES, R.; VAN WEZEL, G. P.; MEDEMA, M. H.; RAAIJMAKERS, J. M. Pathogen-induced activation of disease-suppressive functions in the endophytic root microbiome. *Science*, v. 366, p. 606-612, 2019.
- CHAPELLE, E.; MENDES, R.; BAKKER, P. A. H. M.; RAAIJMAKERS, J. M. Fungal invasion of the rhizosphere microbiome. *The ISME Journal*, v. 10, p. 265-268, 2015.
- CHIARAMONTE, J. B. **The rhizosphere microbiome of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and the effects on phosphorus uptake.** 2018. 121 f. Tese (Doutorado em Agronomia Microbiologia Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.
- CHIARAMONTE, J. B.; MENDES, L. W.; MENDES, R. Rhizosphere microbiome and soil-borne diseases. In: GUPTA, V. V. S. R.; SHARMA, A. K. (ed.). **Rhizosphere biology: interactions between microbes and plants.** Singapore: Rhizosphere Biology, Springer Nature, 2020. p. 155-168. DOI: [https://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-6125-2\\_7](https://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-6125-2_7).
- COSKUN, D.; BRITTO, D. T.; SHI, W.; KRONZUCKER, H. J. Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition. *Nature Plants*, v. 3, n. 17074, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/nplants.2017.74>.
- FARIA, M. R. **Dinâmica da comunidade bacteriana da rizosfera de trigo durante a infecção por *Bipolaris sorokiniana*.** 2020. 114 f. Tese (Doutorado em Agronomia Proteção de Plantas) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- FARIA, M. R.; COSTA, L. S. A. S.; CHIARAMONTE, J. B.; BETTIOL, W.; MENDES, R. The rhizosphere microbiome: functions, dynamics, and role in plant protection. *Tropical Plant Pathology*, v. 1, p. 1, 2020.
- FERREIRA, C. **Dinâmica do microbioma da rizosfera de mandacaru na Caatinga.** 2014. 88 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia Microbiologia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- FLORES, S. W. S. **Composição e funcionalidade do microbioma da rizosfera de feijão selvagem e cultivado.** 2015. 150 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia Microbiologia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- GODOY, F. A. **Identificação de bactérias promotoras de crescimento de trigo e seu impacto na comunidade bacteriana da rizosfera.** 2020. 103 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia Microbiologia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

GRICE, E. A.; SEGRE, J. A. The human microbiome: our second genome. **Annual Review of Genomics and Human Genetics**, v. 13, p. 151-170, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1146/annurev-genom-090711-163814>.

HUNGRIA, M.; ARAÚJO, F. F. Nodulação e rendimento de soja co-inoculada com *Bacillus subtilis* e *Bradyrhizobium japonicum*/*B. elkanii*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 9, p. 1633-1643, 1999.

HUNGRIA, M.; NEVES, M. C. P. Interação entre cultivares de *Phaseolus vulgaris* e estirpes de *Rhizobium* na fixação e transporte do nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 21, n. 2, p. 127-140, 1986.

KAVAMURA, V. N. **Bactérias associadas às cactáceas da Caatinga: promoção de crescimento de plantas sob estresse hídrico**. 2013. 244 f. Tese (Doutorado em Ciências Microbiologia Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

KAVAMURA, V. N.; HAYAT, R.; CLARK, I. M.; ROSSMANN, M.; MENDES, R.; HIRSCH, P. R.; MAUCLINE, T. H. Inorganic nitrogen application affects both taxonomical and predicted functional structure of wheat rhizosphere bacterial communities. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, p. 1074, 2018b.

KAVAMURA, V. N.; MELO, I. S. Effects of different osmolarities on bacterial biofilm formation. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 45, n. 2, p. 627-631, 2014.

KAVAMURA, V. N.; MENDES, R.; BARGAZ, A.; MAUCLINE, T. H. Defining the wheat microbiome: towards microbiome-facilitated crop production. **Computational and Structural Biotechnology Journal**, v. 19, p. 1200-1213, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.csbj.2021.01.045>.

KAVAMURA, V. N.; ROBINSON, R. J.; HUGHES, D.; CLARK, I.; ROSSMANN, M.; MELO, I. S.; HIRSCH, P. R.; MENDES, R.; MAUCLINE, T. H. Wheat dwarfing influences selection of the rhizosphere microbiome. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1452, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-58402-y>.

KAVAMURA, V. N.; SANTOS, S. N.; SILVA, J. L.; PARMA, M. M.; AVILA, L. A.; VISCONTI, A.; ZUCCHI, T. D.; TAKETANI, R. G.; ANDREOTE, F. D.; MELO, I. S. Screening of Brazilian cacti rhizobacteria for plant growth promotion under drought. **Microbiological Research**, v. 168, n. 4, p. 183-191, 2013a.

KAVAMURA, V. N.; SANTOS, S. N.; TAKETANI, R. G.; VASCONCELLOS, R. L. F.; MELO, I. S. Draft genome sequence of plant growth-promoting drought-tolerant *Bacillus* sp. strain CMAA 1363 isolated from the Brazilian Caatinga Biome. **Genome announcements**, v. 5, n. 5, e01534-16, 2017.

KAVAMURA, V. N.; TAKETANI, R. G.; FERREIRA, C.; MELO, I. S.; MENDES, R. The role of species turnover in structuring bacterial communities in a local scale in the cactus rhizosphere. **Plant and Soil**, v. 425, p. 101-112, 2018a.

KAVAMURA, V. N.; TAKETANI, R. G.; LANÇONI, M. D.; ANDREOTE, F. D.; MENDES, R.; MELO, I. S. Water regime influences bulk soil and rhizosphere of *Cereus jamacaru* bacterial communities in the Brazilian Caatinga biome. **PLoS ONE**, v. 8, n. 9, e73606, 2013b.

KLEIN, E.; OFEK, M.; KATAN, J.; MINZ, D.; GAMLIEL, A. Soil suppressiveness to *Fusarium* disease: shifts in root microbiome associated with reduction of pathogen root colonization. **Phytopathology**, v. 103, p. 23-33, 2013.

- LANÇONI, M. D.; TAKETANI, R. G.; KAVAMURA, V. N.; MELO, I. S. Microbial community biogeographic patterns in the rhizosphere of two Brazilian semi-arid leguminous trees. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 29, p. 1233-1241, 2013.
- LEBEIS, S. L.; PAREDES, S. H.; LUNDBERG, D. S.; BREAKFIELD, N.; GEHRING, J.; McDONALD, M.; MALFATTI, S.; RIO, T. G.; JONES, C. D.; TRINGE, S. G.; DANGL, J. L. Salicylic acid modulates colonization of the root microbiome by specific bacterial taxa. **Science**, v. 34, p. 860-864, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aaa8764>
- LEKBERG, Y.; ARNILLAS, C. A.; BORER, E. T.; BULLINGTON, L. S.; FIERER, N.; KENNEDY, P. G.; LEFF, J.; LUIS, A. D.; SEABLOOM, E. W.; HENNING, J. A. Nitrogen and phosphorus fertilization consistently favor pathogenic over mutualistic fungi in grassland soils. **Nature Communications**, v. 12, n. 3484, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/s41467-021-23605-y>.
- LEVY, A.; GONZALEZ, I. S.; MITTELVIEFHAUS, M.; CLINGENPEEL, S.; PAREDES, S. H.; MIAO, J.; WANG, K.; DEVESCOVI, G.; STILLMAN, K.; MONTEIRO, F.; ALVAREZ, B. R.; LUNDBERG, D. S.; LU, T.-Y.; LEBEIS, S.; JIN, Z.; McDONALD, M.; KLEIN, A. P.; FELTCHER, M. E.; RIO, T. G.; GRANT, S. R.; DOTY, S. L.; LEY, R. E.; ZHAO, B.; VENTURI, V.; PELLETIER, D. A.; VORHOLT, J. A.; TRINGE, S. G.; WOYKE, T.; DANGL, J. F. Genomic features of bacterial adaptation to plants. **Nature Genetics**, v. 50, p. 138-150, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/s41588-017-0012-9>.
- MENDES, L. W.; CHAVES, M. G.; FONSECA, M. C.; MENDES, R.; RAAIJMAKERS, J. M.; TSAI, S. M. Resistance breeding of common bean shapes the physiology of the rhizosphere microbiome. **Frontiers in Microbiology**, v. 10, p. 1-10, Article 2252, Oct. 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2019.02252>.
- MENDES, L. W.; MENDES, R.; RAAIJMAKERS, J. M.; TSAI, S. M. Breeding for soil-borne pathogen resistance impacts active rhizosphere microbiome of common bean. **The ISME Journal**, v. 12, p. 3038-3042, 2018b. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/s41396-018-0234-6>.
- MENDES, L. W.; RAAIJMAKERS, J. M.; De HOLLANDER, M.; Influence of resistance breeding in common bean on rhizosphere microbiome composition and function. **The ISME Journal**, v. 12, n. 1, p. 212-224, 2018a. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/ismej.2017.158>.
- MENDES, R.; GARBEVA, P.; RAAIJMAKERS, J. M. The rhizosphere microbiome: significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 37, p. 634-663, 2013.
- MENDES, R.; KRUIJT, M.; DE BRUIJN, I.; DEKKERS, E.; VAN DER VOORT, M.; SCHNEIDER, J. H. M.; PICENO, Y. M.; DESANTIS, T. Z.; ANDERSEN, G. L.; BAKKER, P. A. H. M.; RAAIJMAKERS, J. M. Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria. **Science**, v. 332, p. 1097-1100, 2011.
- MENDES, R.; RAAIJMAKERS, J. M. Cross-kingdom similarities in microbiome functions. **The ISME Journal**, v. 1, p. 1-3, 2015.
- MEYER, F.; PAARMANN, D.; D' SOUZA, M.; OLSON, R.; GLASS, E. M.; KUBAL, M.; PACZIAN, T.; RODRIGUEZ, A.; STEVENS, R.; WILKE, A.; WILKENING, J.; EDWARDS, R. A. The metagenomics RAST server: a public resource for the automatic phylogenetic and functional analysis of metagenomes. **BMC Bioinformatics**, v. 9, p. 386-393, 2008.
- PÉREZ-JARAMILLO, J. E.; CARRIÓN, V. J.; BOSSE, M.; FERRÃO, L. F. V.; DE HOLLANDER, M.; GARCIA, A. A. F.; RAMÍREZ, C. A.; MENDES, R.; RAAIJMAKERS, J. M. Linking rhizosphere microbiome

composition of wild and domesticated *Phaseolus vulgaris* to genotypic and root phenotypic traits. **The ISME Journal**, v. 11, p. 2244-2257, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/ismej.2017.85>.

PÉREZ-JARAMILLO, J. E.; DE HOLLANDER, M.; RAMÍREZ, C. A.; MENDES, R.; RAAIJMAKERS, J. M.; CARRIÓN, V. J. Deciphering rhizosphere microbiome assembly of wild and modern common bean (*Phaseolus vulgaris*) in native and agricultural soils from Colombia. **Microbiome**, v. 7, n. 114, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.1186/s40168-019-0727-1>.

PÉREZ-JARAMILLO, J. E.; MENDES, R.; RAAIJMAKERS, J. M. Impact of plant domestication on rhizosphere microbiome assembly and functions. **Plant Molecular Biology**, v. 90, p. 635-634, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s11103-015-0337-7>.

RAAIJMAKERS, J. M.; MAZZOLA, M. Soil immune responses. **Science**, v. 352, n. 6292, p. 1392-1393, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1126/science.aaf3252>.

RAAIJMAKERS, J. M.; WELLER, D. M. Natural plant protection by 2, 4-diacetylphloroglucinol-producing *Pseudomonas* spp. in take-all decline soils. **Molecular Plant Microbe Interactions**, v. 11, p. 144-152, 1998.

ROSSMANN, M.; PÉREZ-JARAMILLO, J. E.; KAVAMURA, V. N.; CHIARAMONTE, J. B.; DUMACK, K.; FIORE-DONNO, A. M.; MENDES, L. W.; FERREIRA, M. M. C.; BONKOWSKI, M.; RAAIJMAKERS, J. M.; MAUCHLINE, T. H.; MENDES, R. Multitrophic interactions in the rhizosphere microbiome of wheat: from bacteria and fungi to protists. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 96, p. 1, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1093/femsec/fiaa032>.

ROSSMANN, M.; SARANGO-FLORES, S. W.; CHIARAMONTE, J. B.; KMIT, M. C. P.; MENDES, R. Plant microbiome: composition and functions in plant compartments. In: PYLRO, V.; ROESCH, L. (ed.). **The Brazilian Microbiome**. Berlin: Springer International Publishing, 2017, p. 7-20.

SANTOS, S. N.; KAVAMURA, V. N.; SILVA, J. L.; MELO, I. S.; ANDREOTE, F. D. Plant growth promoter rhizobacteria in plants inhabiting harsh tropical environments and its role in agricultural improvements. In: MAHESHWARI, D. K. (ed.). **Plant Growth and Health Promoting Bacteria**, Berlin: Springer-Verlag, 2011, p. 251-272.

SCHMUTZ, J.; WHEELER, J.; GRIMWOOD, J.; DICKSON, M.; YANG, J.; CAOILE, C.; BAJOREK, E.; BLACK, S.; CHAN, Y. M.; DENYS, M.; ESCOBAR, J.; FLOWERS, D.; FOTOPULOS, D.; ARCIA, C.; GOMEZ, M.; GONZALES, E.; HAYDU, L.; LOPEZ, F.; RAMIREZ, L.; RETTERER, J.; RODRIGUEZ, A.; ROGERS, S.; SALAZAR, A.; TSAI, M.; MYERS, R. M. Quality assessment of the human genome sequence. **Nature**, v. 429, p. 365-368, 2004. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/nature02390>.

TAKETANI, R. G.; LANÇONI, M. D.; KAVAMURA, V. N.; DURRER, A.; ANDREOTE, F. D.; MELO, I. S. Dry season constrains bacterial phylogenetic diversity in a semi-arid rhizosphere system. **Microbial Ecology**, v. 73, p. 153-161, 2017.

VAN DER VOORT, M.; KEMPENAAR, M.; VAN DRIEL, M.; RAAIJMAKERS, J. M.; MENDES, R. Impact of soil heat on reassembly of bacterial communities in the rhizosphere microbiome and plant disease suppression. **Ecology Letters**, v. 19, p. 375-382, 2016.

ZHAO, L. The tale of our other genome. **Nature**, v. 465, p. 879-880, 2010.



# BIOINSUMOS DE ORIGEM VEGETAL PARA USO NA AGRICULTURA

*Sonia Claudia do Nascimento de Queiroz, Vera Lúcia Ferracini, Jeanne Scardini Marinho-Prado, Marcia Regina Assalin, Debora Renata Cassoli de Souza Dutra, Ana Lúcia Penteado, Claudio Martín Jonsson, Daniel Terao, Antonio Luiz Cerdeira, Wagner Bettiol, André May e Fernanda Garcia Sampaio*

## INTRODUÇÃO

Grande parte do sucesso atribuído às modernas práticas agrícolas é decorrente da descoberta e da adoção de substâncias químicas para o controle fitossanitário das espécies cultivadas. Assim, a elevação da produtividade, associada à “revolução verde”, não teria ocorrido sem a contribuição desses compostos sintéticos para o fornecimento abundante de alimentos de alta qualidade, principalmente em nações com maior nível de desenvolvimento tecnológico, reduzindo, assim, a preocupação constante com a distribuição de alimentos para sua população (Dayan et al., 2009).

O Brasil tem grande destaque no cenário agrícola mundial, pelo fato de ser um dos maiores produtores das commodities soja, açúcar, café, milho, entre outras, colocando-o também como um dos maiores consumidores de agrotóxicos do mundo. Em decorrência desse processo a que o Brasil está submetido, muitas preocupações têm sido recorrentes, principalmente com relação ao potencial impacto dessas moléculas no ambiente e na saúde humana. Incluem-se entre os danos potencialmente causados: i) a poluição de águas, do solo e do ar, que transfere os resíduos químicos ao longo da cadeia produtiva; ii) redução da biodiversidade e fixadores de nitrogênio; iii) destruição da vida marinha e/ou alterações genéticas nas futuras gerações; iv) mudanças nos balanços biológicos naturais, por meio da redução de insetos benéficos e dos inimigos naturais, de abelhas e de pássaros, v) impacto negativo em organismos não alvo, incluindo os seres humanos; vi) comprometimento da sustentabilidade da vida selvagem (Stoytcheva, 2011; Benelli et al., 2017). Além disso, como agravante da situação exposta, muitos agricultores ainda utilizam esses insumos agrícolas de maneira irregular e sem treinamento adequado, potencializando os impactos advindos de sua utilização.

Em razão do risco causado pela utilização desenfreada de agrotóxicos e aos potenciais danos causados ao ecossistema, bem como pela falta de produtos alternativos no mercado, os produtores rurais vêm demandando a oferta de novos produtos e insumos de menor impacto econômico, ambiental e social.

Considerando que ainda há muito espaço para inovação nas práticas agropecuárias, a Embrapa vem, nos últimos anos, investindo em projetos de pesquisas, infraestrutura e na capacitação de equipes multidisciplinares que atuam nessa área. Nesse sentido, destaca-se uma parceria de grande importância que foi estabelecida com a Natural Products Utilization Research (NPURU-USDA-ARS), localizada no Mississippi (Estados Unidos), considerada uma unidade referência nesse tipo de estudo, onde alguns pesquisadores da Embrapa foram treinados.

Mais recentemente, uma iniciativa efetiva para enfrentamento do problema dos agrotóxicos, pela viabilização de alternativas de baixo impacto toxicológico e ecotoxicológico, foi a publicação do Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020, instituído pelo Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (Mapa), o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos, cujo foco principal é aproveitar o potencial da biodiversidade brasileira para reduzir a dependência de insumos importados e ampliar a oferta de matéria-prima para o setor. De acordo com o decreto, considera-se bioinsumo 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, plantas, microrganismos e substâncias derivadas e que interajam com os produtos e os processos físico-químicos e biológicos.

A cartela de bioinsumos é ampla e abrange desde inoculantes; promotores de crescimento de plantas; biofertilizantes; produtos para nutrição vegetal e animal; extratos vegetais; defensivos produzidos a partir de microrganismos benéficos para o controle de pragas, parasitas e doenças; produtos fitoterápicos ou tecnologias que contêm biológicos na composição, seja para plantas ou animais, como para processamento e pós-colheita.

Nesse capítulo, será realizada uma revisão sobre as principais estratégias utilizadas na descoberta de moléculas bioativas de origem vegetal com potencial de uso na formulação de bioinsumos. Abrange também uma revisão sobre os produtos comerciais existentes no Brasil, resultados de pesquisas realizadas pela equipe da Embrapa Meio Ambiente, bem como avanços e perspectivas sobre o tema.

## PLANTAS COMO FONTE DE NOVOS BIOINSUMOS

Produtos naturais têm sido utilizados para o controle de pragas desde o início da agricultura. Entretanto, com o avanço de novas tecnologias ao longo dos últimos 60 anos, moléculas isoladas a partir de plantas têm sido objeto de investigações contínuas, principalmente em virtude de sua variabilidade estrutural e de potentes atividades biológicas. A complexidade das moléculas é resultado de um *screen* natural que seleciona compostos derivados das vias biossintéticas associadas ao metabolismo secundário, com atividades biológicas contra outros organismos, muitas vezes por meio de novos mecanismos de ação. Compostos fenólicos, estilbenos, cumarinas e poliflavonoides são metabólitos secundários com importância na defesa de plantas contra ataques (Swanton et al., 2011). Assim, as plantas são excelentes fontes de moléculas bioativas, com potencial para utilização na formulação de bioinsumos, sendo particularmente importantes no combate à evolução da resistência de pragas e doenças aos produtos existentes no mercado, em razão dos mecanismos de ação diferenciados, que, muitas vezes, ainda são desconhecidos. Além disso, o fato de essas moléculas naturais conterem poucos átomos de halogênios pode gerar produtos com persistências relativamente curtas no ambiente, baixas toxicidades para organismos não alvo. Quando utilizadas na forma de extrato, o risco de desenvolvimento de resistência devida ao uso contínuo diminui. Além disso, são biodegradáveis e, portanto, promovem a agricultura sustentável (Dayan et al., 2009; Seiber et al., 2014).

Esses produtos podem ser aplicados diretamente na forma de extratos, óleos essenciais ou como substâncias purificadas. No entanto, para evitar a degradação rápida e melhorar a eficiência, estratégias envolvendo a nanotecnologia são utilizadas durante a formulação. As substâncias bioativas que apresentam estruturas simples e eficácia comprovada podem servir de protótipo para a síntese química na fase posterior, que é o desenvolvimento de novos pesticidas.

No Brasil, ainda não existe uma instrução normativa conjunta (INC) que normalize diferenciadamente o registro de produtos agrotóxicos derivados de vegetais. Alguns óleos essenciais, que evocam respostas específicas em alguns insetos, podem ser enquadrados na Instrução Normativa Conjunta nº 1, de 23 de janeiro de 2006 (Brasil, 2006). Também existe a possibilidade de enquadrar alguns produtos à base de vegetais como bioquímicos, conforme descrito na Instrução Normativa Conjunta nº 32, de 26 de outubro de 2005 (Brasil, 2005).

## ESTRATÉGIAS UTILIZADAS NO DESCOBRIMENTO DE NOVOS PESTICIDAS NATURAIS

### Compostos conhecidos e avaliação de novas atividades

Geralmente, os compostos naturais conhecidos que têm as estruturas elucidadas já foram testados em algum bioensaio anteriormente. No entanto, poucos desses compostos foram submetidos a testes para avaliar o potencial de suas atividades como pesticidas naturais (herbicidas, fungicidas, inseticidas, algicidas, entre outros). Portanto, em vez de testar todos os compostos já isolados aleatoriamente, recomenda-se uma seleção prévia baseada nas estruturas químicas e nas atividades biológicas já descritas. Têm prioridade para os bioensaios agronômicos os compostos com estruturas semelhantes à das fitotoxinas conhecidas, estruturas parecidas com a dos inibidores enzimáticos ou de compostos com determinadas funções nas plantas. Isso é o chamado descobrimento guiado por estruturas semelhantes (Morales et al., 2016).

### Descobrimto de novos compostos bioativos

Embora as plantas forneçam um número enorme de compostos naturais com alguma atividade biológica, mas que ainda não foram testados para uso como pesticida, a seleção para testes em bioensaios pode, em tese, ser aleatória. A química combinatorial e o *high throughput screening* têm sido a maneira como as companhias de agroquímicos conduzem suas descobertas (Lindell et al., 2009). Entretanto, os custos desse tipo de abordagem são elevados, além do fato de a diversidade de moléculas ser enorme. Desse modo, a seleção de espécies baseada nas abordagens etnobotânicas, relações ecológicas e relatórios etnobotânicos tem mostrado ser também uma boa alternativa (Morales et al., 2016). Assim, com base nessas informações, são selecionadas as espécies de plantas a serem testadas.

### Isolamento guiado por bioensaio

Para a descoberta de moléculas bioativas, o *screening* de extratos de plantas seguido de isolamento guiado por bioensaios é considerado uma das melhores estratégias (Khan et al., 2019). Um esquema ilustrativo das etapas utilizadas nesse tipo de abordagem está ilustrado na Figura 20.1.

Na etapa denominada *screening*, extratos de diferentes plantas obtidos com o mesmo solvente ou a mesma planta extraída com solventes de diferentes polaridades (p.

ex., hexano, diclorometano, acetato de etila e metanol) são preparados e testados nos bioensaios selecionados. Esses bioensaios devem ser preferencialmente simples, rápidos, sensíveis e de baixo custo, e podem ser utilizados para avaliar a atividade biológica desejada (p. ex., antifúngica, antibacteriana, inseticida, herbicida, entre outras). Após o término dos bioensaios, os extratos que apresentarem melhores respostas quanto à atividade biológica são selecionados para a etapa seguinte, denominada isolamento guiado por bioensaio.

Como as plantas produzem compostos a partir de seu metabolismo primário e secundário, durante a extração uma mistura complexa de moléculas é extraída, e não é possível atribuir a atividade a uma molécula específica, tornando impossível uma relação causa-efeito inequívoca. Assim, para conhecer a molécula (ou grupo de moléculas) que tem o efeito biológico, é necessário realizar o fracionamento dos extratos. Para isso, podem ser utilizadas partições com solventes imiscíveis que separam grupos de substâncias com diferentes polaridades ou por meio de técnicas cromatográficas, como a flash preparativa. A cada fracionamento, repete-se o bioensaio e seleciona-se a nova fração ativa (com menor quantidade de moléculas diferentes) para posteriores fracionamentos/bioensaios, até a obtenção da fração purificada (com poucos compostos) ou o completo isolamento da molécula (pura).

Após a obtenção da molécula purificada, é possível identificá-la e, assim, atribuir a atividade biológica. Para a elucidação estrutural, utilizam-se a espectrometria de massas de alta resolução (*mass spectrometry* – MS), a ressonância magnética nuclear (RMN) e o infravermelho (IV). As diferentes informações são interpretadas em conjunto até a atribuição da estrutura. Apesar de o isolamento guiado por bioensaio ser uma técnica ainda pouco utilizada no descobrimento de pesticidas, alguns trabalhos podem ser citados como referências a esse tipo de isolamento, como o do tabanone a partir da Cogongrass (*Imperata cylindrica* (L.) (Cerdeira et al., 2012) e de alguns acetilenos da *Conyza canadensis* (L.) Cronquist (Queiroz et al., 2012).

## Desreplicação e elucidação estrutural por cromatografia acoplada à espectrometria de massas

Durante o processo de fracionamento guiado por bioensaio é possível acompanhar o perfil cromatográfico das frações obtidas a fim de evitar o isolamento de substâncias conhecidas, evitando, muitas vezes, um enorme e desnecessário esforço na etapa de isolamento. Com isso, é possível focar a descoberta de substâncias inéditas. Esse tipo de abordagem é denominado desreplicação. As técnicas utilizadas para essa finalidade devem ser rápidas e sensíveis, tais como a cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS), que é utilizada para moléculas voláteis e estáveis termicamente, e a cromatografia líquida de alta eficiência acoplada à espec-

trometria de massas (LC-MS/MS), utilizada para moléculas instáveis termicamente, mais polares e com massas moleculares maiores. Geralmente, um espectrômetro de massas tipo Q-ToF é utilizado no (LC-MS/MS), que, por ser de alta resolução, fornece informação estrutural dos compostos e a possível fórmula molecular, e no GC-MS geralmente apresenta uma biblioteca de espectros de massas, tal como a NIST. Com as informações obtidas nas análises por LC-MS/MS e/ou GC-MS dos compostos (tais como massa e fórmula molecular, padrão isotópico, perfil de fragmentação, modo de ionização), pesquisas na literatura e nas últimas versões do *Dictionary of Natural Products*, *Antibase* e *SciFinder*, entre outras, são realizadas.

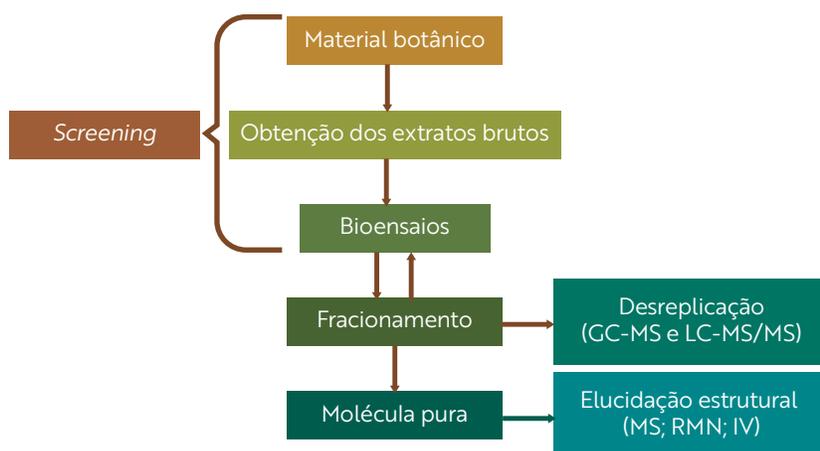


Figura 20.1. Esquema da estratégia a ser utilizada para descoberta de substâncias bioativas.

## NANOENCAPSULAMENTO DE ÓLEOS ESSENCIAIS E EXTRATOS VEGETAIS

Embora o uso de óleos essenciais possa ser interessante para reduzir o uso de pesticidas sintéticos, sua utilização maciça na agricultura tem sido limitada pelo fato de serem rapidamente degradáveis nas condições ambientais, apresentarem alta volatilidade, pouca atividade residual, baixa persistência e baixa solubilidade, podendo, ainda, apresentar fitotoxicidade (Wang et al., 2019). Entretanto, o crescente interesse no uso desses compostos bioativos na agricultura tem levado ao desenvolvimento de soluções utilizando técnicas e ferramentas inovadoras, como a nanotecnologia.

As nanoformulações obtidas por meio do encapsulamento dos compostos ativos de interesse agrícola constituem sistemas de liberação controlada capazes de proteger

os compostos bioativos da degradação prematura no campo, melhorar a sua forma de dispersão no meio, além de contribuir para um aumento de eficácia, com menores doses e números de aplicações. Os materiais encapsulantes devem ser biocompatíveis, biodegradáveis e apresentarem baixas toxicidades, o que, em associação com os bioativos de origem natural, resultam em formulações pesticidas mais seguras tanto para seres humanos como para organismos não alvo, além de diminuir o risco de contaminação ambiental, sendo consideradas formulações ambientalmente amigáveis. Vários materiais têm sido utilizados para encapsular tais compostos, como nanomateriais poliméricos (de origem natural e sintética), nanopartículas lipídicas sólidas, nanomateriais inorgânicos porosos, nanoargilas etc., dando origem a diferentes tipos de nanomateriais, por exemplo, nanocápsulas, nanoesferas, micelas, lipossomas, entre outros, obtidos por diferentes métodos de obtenção.

Embora muitos avanços tenham sido obtidos no desenvolvimento de formulações à base de produtos de origem natural, alguns fatores ainda podem restringir seu amplo uso na agricultura. Um deles é a obtenção do composto bioativo, cujas dificuldades estão relacionadas à variação de sua composição, custos e dificuldades de otimização relacionados com a obtenção, extração e purificação, bem como as dificuldades visando à qualidade e à quantidade dos compostos bioativos. Além disso, a determinação da concentração dos compostos bioativos a ser aplicada é um fator bastante crítico no efeito biológico desejado, principalmente quando em sistemas de liberação controlada. Adicionalmente, as nanopartículas podem ser facilmente internalizadas, translocadas e acumuladas em diferentes compartimentos das células das plantas, resultando em efeitos adversos e inesperados. Por esse motivo, deve-se estudar o destino dessas nanopartículas nos diversos compartimentos nos quais estas serão utilizadas. O uso de sistemas nanoestruturados na agricultura, embora recente, apresenta forte tendência de crescimento, o que implica o desenvolvimento de formulações eficazes e sustentáveis, com amplo conhecimento de possíveis efeitos tóxicos e fitotóxicos.

### **Métodos analíticos para determinação da concentração dos princípios ativos na formulação**

Os métodos utilizados na caracterização de nanoformulações representam uma importante ferramenta para saber sobre a aplicação, a absorção e a toxicidade desse sistema, e os critérios para escolha da técnica analítica são baseados no tipo de matriz, concentração esperada dos ativos, complexidade da amostra e propriedades inerentes. Vários métodos de caracterização têm sido reportados e amplamente utilizados (Singh et al., 2021). A determinação da concentração dos ativos em nanoformulações em suspensão geralmente utiliza como técnica inicial a ultrafiltração/centrifugação para nanopartículas maiores que 10 nm. Um filtro de celulose regenerada com corte

molecular de 10 KDa é ajustado ao tubo de centrífuga (tipo Eppendorf), em que uma alíquota da suspensão da nanoformulação recentemente preparada é adicionada. Somente o material não encapsulado passa através do filtro. A quantificação do ativo encapsulado baseia-se no cálculo da diferença entre o ativo presente no sobrenadante e a quantidade do ativo que foi adicionada. Esse cálculo também é utilizado quando se quer determinar a eficiência de encapsulamento (Kumar et al., 2014). A quantificação dos compostos não encapsulados é realizada pelas ferramentas disponíveis para análises de moléculas orgânicas. Para isso, utilizam-se diversas metodologias, e na literatura há vários estudos. Nanopartículas de zeína contendo os compostos botânicos limoneno e carvacrol foram estudadas por Monteiro et al. (2021), que analisaram esses ativos no sobrenadante por cromatografia líquida de alta eficiência com detecção ultravioleta (HPLC-UV). A quantidade de compostos encapsulados foi calculada indiretamente pela diferença entre a quantidade adicionada ao sistema e a quantidade não encapsulada. Forim et al. (2013) utilizaram a mesma técnica, cromatografia líquida com detector ultravioleta para determinação de azadiractina em nano/micropartículas poliméricas e, também, para calcular a eficiência de encapsulamento. Curcumina, em nanopartículas de ácido poli-L-lático foi analisada utilizando HPLC-UV, com preparo prévio envolvendo secagem de 1 mL da emulsão da nanopartícula e ressuspenção em diclorometano:metanol (Silva-Buzanello et al., 2015). Para avaliar atividade inseticida, nanopartículas formadas do encapsulamento de óleo essencial de *Rosmarinus officinalis* e *Zataria multiflora* foram preparadas utilizando policaprolactona e quitosana. A quantidade de óleo não encapsulado, obtida após ultrafiltração/centrifugação, foi determinada pela medida da absorbância dos óleos utilizando espectrômetro de UV/VIS de 319 e 274 nm (*Rosemary* e *Zataria*, respectivamente) (Ahsaei et al., 2020). A cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massa também é utilizada, principalmente na análise da abundância e porcentagem dos componentes em óleos essenciais submetidos a encapsulamentos. Yang et al. (2009) avaliaram a atividade inseticida de nanopartículas de polietilenoglicol carregada com óleo essencial de alho. Nesse estudo, avaliou-se a variação na composição desse óleo antes e após o encapsulamento. Com essas ferramentas de análise, é possível acompanhar a eficiência com que a nanopartícula foi encapsulada e o tempo de liberação dos ativos para uma melhor compreensão de todo o sistema.

### Avaliação da estabilidade das nanoformulações

Para que se possa conhecer a estabilidade das nanoformulações em médio e longo prazo, é necessário realizar alguns estudos. Existem várias publicações sobre esse assunto, e um protocolo para avaliação da estabilidade das nanoformulações está descrito a seguir.

### **Estabilidade termodinâmica**

Segundo Benelli et al. (2020), para avaliar a estabilidade termodinâmica, as amostras das nanoformulações devem ser estocadas em temperatura ambiente em 12:12 h (luz:escuro) por seis meses. A estabilidade físico-química deve ser avaliada repetindo análises de DLS (*dynamic light scattering*) nos tempos: zero dias (t<sub>0</sub>), um mês (t<sub>1</sub>), três meses (t<sub>3</sub>) e seis meses (t<sub>6</sub>).

### **Estabilidade acelerada**

A estabilidade das nanoformulações deve ser avaliada em três fases (centrifugação, ciclos de aquecimento e resfriamentos e ciclos de congelamento e descongelamento), de acordo com a metodologia descrita por Alkilani et al. (2018). Inicialmente, as nanoemulsões são centrifugadas a 3,500 rpm por 15 minutos. Se nenhuma separação de fases for observada, as nanoemulsões são sujeitas a seis ciclos de aquecimento (45 °C) e resfriamento (4 °C), com um período de estocagem para cada temperatura de 48 horas. Se as nanoemulsões permanecerem estáveis, são sujeitas a três ciclos de congelamento (-21 °C) e descongelamento (25 °C) por 48 horas para cada temperatura. No final de cada fase, as amostras são analisadas por meio de inspeção visual e de DSL.

## **Produtos de origem vegetal para controle de plantas daninhas**

O controle químico das plantas daninhas tem sido um campo dinâmico de pesquisa. O uso rotacional de herbicidas de acordo com seus modos de ação (*modes of action* – MoAs) e a busca por herbicidas que apresentem amplo espectro de controle, comportamento ambiental seguro e baixa toxicidade fazem parte dos esforços para conter a disseminação das plantas daninhas resistentes aos herbicidas atuais. Embora o processo sintético gere uma grande quantidade de moléculas com potencial tóxico às plantas, estas afetam um número relativamente pequeno de mecanismos de ação, e nos últimos 30 anos nenhum herbicida tem sido comercializado contendo um novo modo de ação (Umetsu; Shirai, 2020).

Moléculas naturais com potencial tóxico às plantas, chamadas de fitotoxinas, são produtos do metabolismo secundário em resposta às interações bióticas e abióticas do organismo com o meio em que vive (Dayan; Duke, 2020; Zhou et al., 2020; Yu et al., 2021). As fitotoxinas caracterizam-se por apresentar peso molecular maior, fortes ligações entre os átomos de carbono e halogênios, estrutura complexa e quantidades maiores de oxigênio e nitrogênio quando comparadas com a estrutura dos herbicidas sintéticos, que, pelo processo industrial de síntese, limitam a construção da estrutura final da molécula, dado o custo da síntese (Henkel et al., 1999). Além disso, Dayan et al. (1999) reportam que há pouca sobreposição de mecanismos de ação entre fitotoxinas e moléculas sintéticas. As fitotoxinas tendem a ser mais complexas estruturalmen-

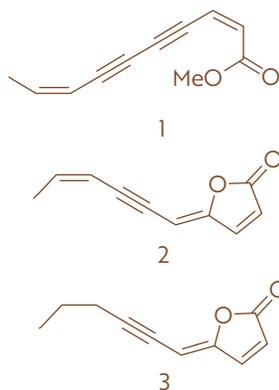
te que os herbicidas sintéticos. Entretanto, há, muitas vezes, uma similaridade entre algumas fitotoxinas e certos herbicidas sintéticos comerciais (Dayan; Duke, 2020; Taban et al., 2020).

A alelopatia oferece um novo caminho para a descoberta de compostos que podem ser empregados como pesticidas. O termo “alelopatia” tem sofrido várias alterações durante o tempo (Molish, 1937; Rice, 1974, 1984). A definição adotada pela Sociedade Internacional de Alelopatia (SIA) em 1996 é “A ciência que estuda qualquer processo envolvendo metabólitos secundários produzidos por plantas, algas, bactérias, e fungos que influenciam o crescimento e desenvolvimento dos sistemas biológicos e agrícolas”.

Entre as fitotoxinas, os aleloquímicos têm sido utilizados como alternativa ao uso de defensivos agrícolas sintéticos. Fitotoxinas em baixas concentrações são capazes de apresentar maior toxicidade às plantas que as moléculas sintéticas e, na maioria das vezes, afetam mecanismos de ação ainda inexplorados (Duke et al., 1998). A identificação correta do local primário de ação da fitotoxina com propriedade herbicida é uma tarefa desafiadora, pois esta interfere em muitas rotas metabólicas na planta.

Assim, programas de desenvolvimento de novos pesticidas que utilizam como fonte de moléculas os produtos naturais devem ser explorados. A diversidade das fitotoxinas presente nas plantas e microrganismos possibilitam a descoberta de novos pesticidas com diferentes mecanismos de ação.

Em pesquisa promovida em parceria entre a Embrapa Meio Ambiente e o NPU-RU-USDA-ARS, foi realizado um estudo com a planta *Conyza canadensis* (L) Cronquist syn. (conhecida como buva), que é uma planta daninha problemática e invasiva, com propriedades alelopáticas. Para identificar os constituintes fitotóxicos da parte aérea, procedeu-se a um fracionamento guiado por bioensaio do extrato feito com diclorometano. Três componentes ativos foram isolados e identificados, sendo (2Z,-8Z)-matricaria acid methyl ester, (4Z,8Z)-matricaria lactone e (4Z)-lachnophyllum lactone, conforme Figura 20.2. As lactonas inibiram o crescimento da monocotiledônea *Agrostis stolonifera* (bentgrass) e da dicotiledônia *Lactuca sativa* (alface) a 1 mg mL<sup>-1</sup>, ao passo que a (2Z,8Z)-matricaria acid methyl ester foi menos ativa. Em um ensaio de dose-resposta para avaliação do crescimento da *Lemna paucicostata*, a (4Z)-lachnophyllum lactone foi mais ativa com uma IC<sub>50</sub> de 104 µM, ao passo que a (4Z,8Z)-matricaria lactone foi menos ativa (IC<sub>50</sub> de 220 µM) (Queiroz et al., 2012).



**Figura 20.2.** Estruturas químicas *(2Z,8Z)*-matricaria acid methyl ester (1), *(4Z,8Z)*-matricaria lactone (2) e *(4Z)*-lachnophyllum lactone (3).

Outro estudo envolvendo a mesma parceria avaliou a atividade fitotóxica da *Cogongrass*, que é uma espécie invasora e tem propriedades alelopáticas relatadas. A fitotoxicidade de diferentes dos constituintes isolados de raízes e partes aéreas dessa espécie foi avaliada, e não se observou atividade fitotóxica significativa. No entanto, o óleo essencial das partes aéreas foi ativo. Isolamento guiado por bioensaio desse extrato, usando cromatografia em coluna de sílica gel, levou à identificação de megastigmatrienona, 4-(2-butenilideno) – 3,5,5-trimetil-2-ciclohexen-1-ona (também chamada de tabanone), como uma mistura de quatro estereoisômeros responsáveis pela maioria da atividade. O modo de ação desse composto resulta em rápida perda da integridade da membrana e subsequente redução na taxa de fluxo de elétrons fotossintéticos (Cerdeira et al., 2012).

Oršolić et al. (2021) propõem uma modelagem baseada em relação estrutura-atividade (*structure-activity relationship* – SAR), que tem como pressuposto as classificações de herbicidas de acordo com seus MoAs e a seletividade das plantas daninhas. Combinando os modelos preditivos com regras de semelhança a herbicidas, definidas por características, a plataforma de *screening* virtual é proposta para a seleção de pequenas moléculas por suas propriedades. Em outro trabalho recente, Abd-ElGawad et al. (2021) publicaram uma revisão sobre óleos essenciais fitotóxicos, e uma análise quimiométrica foi realizada na tentativa de construir uma relação estrutura-atividade entre a fitotoxicidade e a composição química dos óleos essenciais. A análise dos dados revelou que os terpenos oxigenados e mono- e sesquiterpenos, em particular, desempenham o papel principal na fitotoxicidade de OE. Assim, o uso de SAR tem mostrado ser uma alternativa moderna e eficiente para a descoberta de novos herbicidas.

## PRODUTOS DE ORIGEM VEGETAL PARA CONTROLE DE INSETOS

A pesquisa de novos ativos biológicos com ação inseticida tem seu início em laboratório, onde ocorre a extração dos óleos essenciais ou obtenção dos extratos das plantas em diversos solventes. Em seguida, são preparadas soluções para posterior avaliação da bioatividade sobre os insetos-alvo por meio da ingestão, do contato direto (avaliação tóxica) ou com odores. A partir desses bioensaios, avalia-se a bioatividade dos compostos sobre os insetos, que foi resumidamente categorizada por Isman (2017) como comportamental (causando repelência, impedimento/deterrência alimentar ou impedimento/deterrência de oviposição) ou fisiológica (provocando toxicidade aguda, interrupção do desenvolvimento ou inibição do crescimento).

Algumas substâncias de origem botânica desempenham atividades inseticidas bastante conhecidas, tais como piretrinas, rotenona, nicotina, cevadina, veratrídina, rianodina, quassinoides e biopesticidas voláteis (Isman, 2020). Estes últimos são, normalmente, óleos essenciais presentes nas plantas aromáticas (Isman, 2020). Uma das plantas mais conhecidas é o “nim” (*Azadirachta indica*), uma *Meliaceae* de origem asiática, disseminada por outros continentes, cujo princípio ativo é a azadiractina. No Brasil, já existem plantações dessa árvore nas regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sul. Como seu princípio ativo é uma molécula complexa, de difícil síntese, os extratos das folhas ou frutos são aplicados diretamente como inseticidas (Dequech et al., 2008). Várias revisões sobre atividade inseticida das plantas e aplicações têm sido publicadas (Duke; Copping, 2007; Kanaak; Fiuza, 2010; Correa; Salgado, 2011; Miresmailli; Isman, 2014; Khan et al., 2017; Isman, 2020; Spletozer et al., 2021).

Pesquisas realizadas em projeto liderado pela Embrapa Meio Ambiente envolveram um *screening* de extratos de plantas e óleos essenciais com ação inseticida. Para isso, foram realizados bioensaios em laboratório com as espécies *Anticarsia gemmatalis* Hubner, 1818 (*Lepidoptera: Erebididae*) e *Helicoverpa armigera* (Hubner) (*Lepidoptera: Noctuidae*), duas importantes pragas de cultivos agrícolas no Brasil (Marinho-Prado et al., 2018, 2019).

A avaliação de extratos vegetais foi iniciada utilizando apenas uma concentração ( $2,5 \text{ mg mL}^{-1}$ ) do extrato em quatro diferentes solventes (hexano, diclorometano, metanol e água). As espécies vegetais utilizadas para a obtenção dos extratos foram *Clerodendrum splendens*, *Conyza canadensis*, *Lantana camara*, *Tithonia diversifolia* e *Vernonanthura westiniana*, e as soluções foram oferecidas às lagartas por ingestão, para avaliação da biologia e do comportamento dos insetos (Marinho-Prado et al., 2018). Os extratos vegetais de *C. splendens* em diclorometano e hexano e de *V. westiniana* em metanol avaliados sobre *A. gemmatalis* causaram as maiores taxas de mortalidade nas lagartas, sendo que o extrato de *C. splendens* em diclorometano causou também redução no tempo de vida e peso larval de pupas. Quando oferecido a lagartas de *H. armigera*, o extrato

metanólico de *V. westiniana* causou aumento no consumo foliar e redução no peso de pupas, sendo observada mortalidade de apenas 20% da população avaliada (Marinho-Prado et al., 2018). Posteriormente, uma segunda etapa foi realizada somente com as soluções que apresentaram bioatividade sobre os insetos no bioensaio anterior, sendo agora oferecidas em diferentes concentrações às lagartas (0, 5, 10, 15, 20 mg mL<sup>-1</sup>), para cálculo da concentração letal a 50% da população (CL<sub>50</sub>), sendo avaliada a mortalidade após 24 e 48 horas, além do consumo diário (dados ainda não publicados).

A avaliação com óleos essenciais seguiu a mesma estrutura em etapas. Em uma primeira etapa, óleos essenciais originados de nove diferentes espécies vegetais, a saber, laranja doce (*Citrus aurantium dulce*), gengibre (*Zingiber officinale Roscoe*), melaleuca (*Melaleuca alternifolia*), canela cássia (*Cinnamomum cassia*), citronela (*Cymbopogon sp.*), menta (*Mentha arvensis*), orégano (*Origanum vulgare*), tomilho (*Thymus vulgaris*) e basilicão (*Ocimum basilicum L.*), foram oferecidos às lagartas na concentração de 2 µL mL<sup>-1</sup> para avaliações biológicas e comportamentais dos insetos (Marinho-Prado et al., 2019). A resposta de *A. gemmatalis* aos nove óleos essenciais avaliados foi diferente em relação à de *H. armigera*, em ambas as espécies, porém, observou-se bioatividade do óleo de basilicão, a qual pode ser devida à ação de seus compostos majoritários, também identificados no trabalho (linalol, 1,8-cineol, cânfora e eugenol). Posteriormente, somente as soluções com melhores resultados foram avaliadas em diferentes concentrações sobre as lagartas (0, 2, 4, 6, 8 e 10 µL mL<sup>-1</sup>), para cálculo da concentração letal a 50% da população (CL<sub>50</sub>), sendo avaliada a mortalidade após 24 e 48 horas, além do consumo diário (dados ainda não publicados).

## PRODUTOS DE ORIGEM VEGETAL PARA CONTROLE DE FUNGOS

Pesquisas *in vitro* vêm demonstrando que diversos fungos fitopatogênicos podem ser controlados com eficiência por meio de extratos vegetais, como o controle de *Fusarium proliferatum* por extratos de alho e capim-santo (Souza et al., 2007), *Colletotrichum gloeosporioides*, por extratos de melão-de-são-caetano e eucalipto (Celoto et al., 2008) e *Bipolaris sorokiniana*, por extrato de cânfora (Franzener et al., 2003), entre outros.

Pesquisa realizada em parceria entre a Embrapa e o NPURU-USDA-ARS envolveu a planta *Conyza canadensis* (L.) Cronquist, da família Asteraceae, que é uma planta daninha conhecida como buva. Após terem sido isoladas da planta, duas lactonas puras foram submetidas a ensaios de bioautografia, usando 10 e 100 µg por ponto, contra os fungos fitopatogênicos *Colletotrichum acutatum*, *Colletotrichum fragariae* e *Colletotrichum gloeosporioides*, e apresentaram resultados positivos. No estudo de dose-resposta contra seis fungos fitopatogênicos, (4Z,8Z)-*matricaria lactona* foi mais ativa que o fungicida co-

mercial azoxystrobina contra os fungos *C. acutatum*, *C. fragariae* e *C. gloeosporioides* na dose de 30  $\mu$ M e com atividade próxima do fungicida comercial captan contra *C. gloeosporioides*, ao passo que a (4Z)-*lactonophyllum lactona* foi menos ativa (Queiroz et al., 2012).

A brusone e a giberela são doenças do trigo provocadas pelos fungos *Pyricularia grisea* (telemorfo *Magnaporthe grisea*) e *Fusarium graminearum* (telemorfo *Gibberella zeae*), respectivamente. Embora substâncias químicas sintéticas venham sendo aplicadas na prevenção e controle desses patógenos, pouco sucesso tem sido alcançado. Em um projeto liderado pela Embrapa Meio Ambiente, testou-se a atividade antifúngica de quatro óleos essenciais: *Ocimum gratissimum* (alfavaca cravo), *Lippia sidoides* (alecrim pimenta), *Lippia alba* (cidreira) e *Danthus caryophyllus* L. (cravo), por ensaio de disco-difusão em ágar, contra dois isolados de *M. grisea* (Py 5003 e Py 36.I) e um de *F. graminearum*. Os óleos de alecrim pimenta, alfavaca cravo e cravo foram os melhores contra Py 5003, com inibição de 95,79 $\pm$ 1,84%, 83,77 $\pm$ 2,88% e 81,38 $\pm$ 1,56%, respectivamente, em concentração de 100%, e promoveram inibições estatisticamente semelhantes a 50%. Na concentração máxima, o alecrim pimenta e a alfavaca cravo induziram as maiores inibições contra Py 36.I, que foram de 92,70 $\pm$ 1,01% e 84,20 $\pm$ 6,24%, respectivamente, ao passo que, para uma concentração de 50% de óleo, o cravo se destacou, com inibição média de 75,80 $\pm$ 1,99%, e o alecrim pimenta, de 57,14 $\pm$ 14,92%. Contra *F. graminearum*, o alecrim pimenta foi o óleo que provocou a maior inibição (64,28 $\pm$ 9,68%). Assim, concluiu-se que os óleos de alfavaca cravo, alecrim pimenta e cravo são potenciais substituintes dos atuais fungicidas comerciais para o controle da brusone e giberela (Mizobuchi et al., 2017).

Em um longo estudo envolvendo os Laboratórios de Produtos Naturais e de Microbiologia Ambiental da Embrapa Meio Ambiente, Stadnik et al. (2003) avaliaram extratos obtidos de 71 plantas e cinco basidiomicetos (fungos) no controle de oídio do pepino. A partir de folhas, flores, frutos, raízes, rizomas, caules e bulbos de plantas invasoras, plantas medicinais, plantas aromáticas e plantas originárias da região do Pantanal Brasileiro, bem como dos corpos de frutificação dos basidiomicetos, foram obtidos látex, óleos essenciais, extratos por maceração e por percolação das seguintes espécies: 1) *Euphorbia tirucallii*; 2) *Poinsettia pulcherrima*; 3) *Plumeria* sp.; 4) *Eucalyptus citridora*; 5) extrato pirolenhoso; 6) *Allamanda cathartica*; 7) *Allium sativum*; 8) *Aloe vera*; 9) *Altherrantera brasiliiana*; 10) *Arnica montana*; 11) *Atropa belladonna*; 12) *Azadirachta indica*; 13) *Baccharis trimera*; 14) *Bidens pilosa*; 15) *Bouganvillea spectabilis*; 16) *Cajanus cajan*; 17) *Calendula officinalis*; 18) *Clavaria* sp.; 19) *Cocos nucifera*; 20) *Coriandrum sativum*; 21) *Cupressus* sp.; 22) *Cymbopogum citratus*; 23) *Cynara scolymus*; 24) *Desmodium tortuosum*; 25) *Euphorbia heterophylla*; 26) *Euphorbia splendens*; 27) *Feijoa sellowiana*; 28) *Ganoderma* sp.; 29) *Ilex paraguariensis*; 30) *Ipomea* sp.; 31) *Lentinula edodes*; 32) *Matricaria chamomilla*; 33) *Mentha piperita*; 34) *Mikania cordifolia*; 35) *Murraya paniculata*; 36) *Oudemansiella canarii*; 37) *Paullinia cupana*; 38) *Peumus boldus*; 39) *Phyllanthus tenellus*;

40) *Pimpinella anisum*; 41) *Pinus taeda*; 42) *Pisolithus tinctorius*; 43) *Psidium guajava*; 44) *Pteridium aquilinum*; 45) *Ricinus communis*; 46) *Sansevieria zeylanica*; 47) *Sonchus oleraceus*; 48) *Symphitium officinalis*; 49) *Vernonia polyanthes*; 50) *Wedelia padulosa*; 51) *Zingiber officinale*; 52) *Lagenaria* sp.; 53) *Agonandra brasiliensis*; 54) *Alchornea discolor*; 55) *Annona cornifolia*; 56) *Bauhinia bauhinioides*; 57) *Bunchosia paraguayensis*; 58) *Couepia uiti*; 59) *Copaifera martii*; 60) *Curatella americana*; 61) *Davilla elliptica*; 62) *Diopyros hispida*; 63) *Erytroxylum anguifugum*; 64) *Fagara hassleriana*; 65) *Gomphrena elegans*; 66) *Hyptis crenata*; 67) *Licania parvifolia*; 68) *Machaerium hirtum*; 69) *Mascaqania bethamiana*; 70) *Melia azedarach*; 71) *Mimosa chaetosphaera*; 72) *Ocotea suaveolens*; 73) *Rhamnidium elaeocarpum*; 74) *Richardia grandiflora*; 75) *Tocoyena formosa*; e 76) *Unonopsis lindimanii*.

Os extratos foram pulverizados em plantas de pepino, e avaliou-se a indução de resistência sistêmica ao oídio. *Aloe vera*, *Bidens pilosa*, *Ganoderma* sp. (basidiomiceto), *Hyptis crenata*, *Mascaqania bethamiana*, *Ocotea suaveolens*, *Oudemansiella canarii* (basidiomiceto), *Pinus taeda*, *Richardia grandiflora* e *Vernonia polyanthes* apresentaram, inicialmente, potencial de induzir a resistência de pepino ao oídio. Em estudos mais detalhados, observou-se que os extratos de *Oudemansiella*, *Ganoderma*, *Pinus taeda* e *Aloe vera* reduziram o número de colônias de oídio em 79, 65, 30 e 21%, respectivamente, nas folhas de pepino não tratadas com os extratos, indicando claramente a indução de resistência. Além disso, os extratos de *Oudemansiella* inibiram a germinação dos conídios do patógeno.

Na sequência, Stadnik e Bettiol (2007) estudaram mais detalhadamente o potencial de extratos de *Oudemansiella canarii* em induzir a resistência de pepino a oídio por meio da ativação das enzimas lipoxigenase e peroxidase. Resumidamente, os resultados obtidos no estudo sugerem que compostos apolares de *O. canarii*, apesar da ação fungitóxica, também podem induzir a resistência sistêmica de plantas de pepino contra *Podosphaera xanthii*.

## Pós-colheita

Consideráveis perdas são ocasionadas por doenças pós-colheita causadas por fungos. Estima-se que, anualmente, 1,3 bilhões de toneladas de produtos frescos colhidos não chegam à mesa do consumidor, e entre as principais causas dessas perdas estão as doenças em pós-colheita, que reduzem tanto a quantidade como a qualidade dos produtos comercializados (Munhuweyi et al., 2017; Terao et al., 2020).

Para controlar essas infecções fúngicas no pós-colheita, têm-se utilizado, predominantemente, fungicidas comerciais. O uso continuado do mesmo princípio ativo tem contribuído para o desenvolvimento de populações de raças resistentes de patógenos, que demanda a aplicação de doses ainda maiores desses produtos, o que, consequentemente, acaba por aumentar o nível de resíduos químicos tóxicos nos produtos frescos. A conscientização do consumidor para consumo de frutas e hortaliças saudáveis,

sem resíduos químicos, além do impacto negativo causado pelos agroquímicos ao meio ambiente, tem aumentado a demanda de pesquisa por alternativas mais seguras e efetivas para minimizar as perdas pós-colheita e para manutenção da qualidade do produto (Maltrose et al., 2021).

Entre essas alternativas, destaca-se como bastante promissor o uso de bioinsumos à base de extrato de plantas e óleos essenciais (Abdolahi et al., 2010). Embora cerca de 10.000 metabólitos vegetais secundários já tenham sido quimicamente definidos como compostos que apresentam atividades antimicrobianas, poucos deles foram explorados para uso prático, e existe, ainda, um grande potencial não identificado disponível na natureza (Duke et al., 2002). Esses metabólitos secundários são considerados alternativas promissoras para controle de doenças pós-colheita de frutas, como aqueles presentes no extrato de *Conyza canadensis* (Queiroz et al., 2012; Terao et al., 2020).

Elshafie e Camele (2016) e Elshafie et al. (2015) observaram atividade de óleo essencial de orégano (*Origanum vulgare* L.) no controle de fungos causadores de doenças pós-colheita de pêssego, *Monilia laxa*, *M. fructigena* e *M. fructicola*, e Mancini et al. (2014) identificaram que os compostos ativos majoritários presentes nesse óleo são: carvacrol, timol, linalol, citral e trans-caryophyllene. O óleo de magnólia (*Magnolia liliflora*) apresenta elevado potencial no controle de *Botrytis cinerea* e *C. capsici*, e o óleo de tomilho (*Thymus* spp.), no controle de *Aspergillus* spp. e de *Penicillium* spp. O efeito antifúngico desses compostos é atribuído tanto à inibição do crescimento micelial quanto à germinação de esporos, impedindo, assim, a infecção inicial e o subsequente desenvolvendo do micélio para além do local de infecção (Rahman; Gul, 2003; Lazar-Baker et al., 2011; Bajapi; Kang, 2012).

Em pesquisa realizada na Embrapa Meio Ambiente, Porto et al. (2017), verificaram que a substância (*4Z*)-*lachnophyllum lactone* (LACH), isolada da *C. canadensis*, exerce atividade inibitória significativa contra o fungo *Penicillium digitatum*, causador da doença do bolor verde na laranja. Nesse trabalho, os autores apresentam um método de extração dos compostos bioativos da planta com água, utilizando um processo em consonância com a química verde, gerando extratos que podem ser aplicados diretamente nas frutas em tratamentos pós-colheita.

Em continuação dessa pesquisa, Terao et al. (2020) avaliaram, em ensaios in vivo, a eficiência dessa substância em controlar o bolor verde em laranja cv. Valência. Observou-se que a eficiência de controle aumenta gradativamente com o aumento da dose, elevando de 23% na dose de 10  $\mu\text{g mL}^{-1}$  para 43% na dose de 100  $\mu\text{g mL}^{-1}$ . Quando a substância LACH na dose de 100  $\mu\text{g mL}^{-1}$  foi aplicada em combinação com a radiação UV-C na dose de 1,5  $\text{kJ m}^2$ , constatou-se uma elevação significativa no nível de controle da doença ao redor de 70%, não diferindo do tratamento com o fungicida, e retardou em sete dias a manifestação de sintomas da doença. Esses resultados indicam que a integração de medidas alternativas de controle apresenta efeitos aditivos na diminui-

ção da intensidade de doenças, por causa dos efeitos sinérgicos que ocorrem entre os tratamentos e a compensação das limitações particulares de cada método. Portanto, a substância LACH, isolada de *C. canadenses*, apresenta potencial para ser explorada comercialmente, como alternativa ao uso de fungicidas no controle de doenças pós-colheita de frutas, principalmente no manejo integrado, combinado com métodos físicos de controle.

Outras pesquisas conduzidas na Embrapa Meio Ambiente relevaram elevada atividade dos óleos essenciais de alecrim pimenta (*Lippia sidoides*), alfavaca cravo (*Ocimum gratissimum*), orégano (*O. vulgare*) e canela casca (*Cinnamomum cassia*) no controle de fungos causadores de doenças pós-colheita de manga (*C. siamense*, *Alternaria alternata*, *Lasiodiplodia theobromae* e *Botryosphaeria dothidea*), de melão (*Fusarium pallidoroseum* e *Alternaria alternata*), de mamão (*A. alternata*, *L. theobromae*, *F. solani*, *C. gloeosporioides* e *Phoma caricae-papayae*) e de laranja (*P. digitatum*) (dados ainda não publicados).

Verificou-se, também, o efeito antifúngico de dois monoterpenos isolados de *Cheopodium ambrosioides* sobre *Sclerotium roffsii* (Paré et al., 1993).

Esses resultados comprovaram a eficiência e o amplo espectro de ação desses óleos essenciais e a grande potencialidade de uso no controle de podridões em frutas, que têm causado grandes prejuízos ao produtor e exportador de frutas e para as quais não existe método de controle eficiente, nem mesmo com a aplicação de fungicidas.

Estudos demonstraram que a combinação de quitosana com óleos essenciais pode ser empregada como revestimento natural no tratamento pós-colheita de frutas, visando ao controle de fungos. A combinação de quitosana com o óleo de orégano ou de canela na concentração de 10 g mL<sup>-1</sup> inibiram completamente o desenvolvimento de *Botrytis* spp., *Penicillium* spp. e *Pilidiella granati*, fungos causadores de doenças pós-colheita em romã. Por outro lado, o efeito inibitório da combinação de quitosana e óleo de capim-limão mostrou-se dependente da concentração do óleo essencial, observando-se completa inibição de *P. granati* na concentração de 10 g mL<sup>-1</sup>, ao passo que a inibição de *Botrytis* spp. e *Penicillium* spp. ocorreu na concentração de 50 g mL<sup>-1</sup> (Munhuweyi et al., 2017).

Portanto, o revestimento natural à base de quitosana e óleos essenciais apresenta-se como uma alternativa limpa e viável ao uso de agroquímicos no controle de doenças pós-colheita de frutas.

Os óleos fixos de *Allium sativum*, *Copaifera langsdorffii* e *Azadirachta indica* e os óleos essenciais de *Pogostemon cablin*, *Mentha arvensis*, *Eucalyptus* spp., *Cymbopogon citratus*, *Ocimum basilicum* var. *Maria bonita*, *Romarinus officinalis*, *Lippia sidoides*, *Zingiber officinale*, *Citrus aurantifolia*, *Piper aduncum* e *Ocimum basilicum* foram avaliados no controle de *P. digitatum* tanto in vitro, como em frutos de laranja pera em pós-colheita utilizando concentrações de 1, 10, 100, 1.000, 10.000 e 100.000 ppm. In vitro, em concentrações superiores a 1%, os óleos inibiram totalmente a germinação dos esporos e o crescimento micelial de *P. digitatum*, bem como controlaram o bolor verde nos frutos.

Entretanto, os óleos nas maiores concentrações causaram fitotoxicidade aos frutos e alteraram seu sabor (Mattos, 2010). Assim, apesar do potencial em controlar a doença em pós-colheita, o uso dos óleos necessita ser integrado com outras técnicas para reduzir a concentração utilizada e não causar problemas aos frutos.

## Controle da ferrugem asiática da soja com óleos de café

A ferrugem asiática da soja, causada por *Phakopsora pachyrhizi*, atualmente a mais importante doença foliar da cultura, é controlada, basicamente, por meio da pulverização de fungicidas (Godoy et al., 2015, 2016). Em razão dos problemas ambientais e da seleção de isolados resistentes aos fungicidas (Godoy, 2012), é de extrema importância o desenvolvimento de produtos alternativos. Nesse sentido, Dorighello et al. (2015), trabalhando com o controle da ferrugem asiática da soja, causada por *Phakopsora pachyrhizi*, verificaram que os óleos de café, obtidos por meio da prensagem fria de grãos de café cru e torrado, além de inibir a germinação dos uredosporos do patógeno, controlaram a ferrugem em ensaios conduzidos em folhas destacadas, casas-de-vegetação e campo.

## PRODUTOS NATURAIS PARA USO COMO ANTIBACTERIANOS

O surgimento e a disseminação de patógenos resistentes a medicamentos, que adquiriram novos mecanismos de resistência, continuam sendo uma ameaça global à saúde. Esses microrganismos multirresistentes são conhecidos como “superbactérias” e causam infecções não tratáveis com os antimicrobianos existentes, como os antibióticos (Organização Mundial de Saúde, 2021).

A descoberta de novos agentes antibacterianos foi baseada, principalmente, em produtos naturais que podem ser obtidos de diferentes fontes, como plantas, bactérias, algas, fungos e animais, entre eles, compostos bioativos de óleos essenciais, que têm sido de grande interesse. A atividade antibacteriana dos óleos essenciais está relacionada à estrutura química de seus constituintes, às quantidades em que estão presentes e às associações entre eles.

Na Embrapa Meio Ambiente, foram desenvolvidos projetos envolvendo diversos óleos essenciais, seus componentes isolados ou em associação com ácidos orgânicos, para avaliação da atividade antimicrobiana, in vitro, contra as linhagens patogênicas *Salmonella typhimurium* ATCC 13311 e *Staphylococcus aureus* ATCC 13565. Para isso, foram testados ao todo 41 óleos essenciais e as combinações em pares dos óleos de alecrim pimenta (*Lippia sidoides* Cham.), capim-limão (*Cymbopogon citratus* Stapf.), tomilho (*Thymus vulgaris* L.), orégano (*Origanum vulgare* L.) e canela (*Cinnamomum cassia* (L.) D. Don. para observar efeitos adicionais ou não na inibição dos microrganismos.

Os melhores resultados de atividades antimicrobianas foram obtidos utilizando os óleos de tomilho, orégano e alecrim pimenta. As combinações de cada par dos óleos de alecrim pimenta, capim-limão, tomilho, orégano e canela não apresentaram melhora adicional no efeito para os patógenos estudados quando comparados com seus óleos testados isoladamente, os compostos majoritários, obtidos por GC-MS, do óleo de orégano foram carvacrol (69,1%) e p-cimeno (18,8%), do óleo essencial de tomilho foram timol (45,5%) e p-cimeno (35,6%), e do alecrim pimenta foram timol (77,2%) e p-cimeno (14,2%). A aplicabilidade dos óleos selecionados ou das substâncias presentes isoladas seria diretamente nos alimentos, com a finalidade de inibir ou controlar o crescimento desses patógenos, ou em embalagens bioativas, contribuindo, assim, para a segurança dos alimentos (Penteado et al., 2021).

Em outra pesquisa, resultado do projeto BRS-AQUA (parceria entre Embrapa e BNDES), avaliou-se o efeito da mistura das substâncias timol e terpinoleno, isoladas de óleos essenciais, com os ácidos orgânicos láctico e cítrico na inibição do *Streptococcus agalactiae*. Para tanto, aplicou-se o método de microdiluição para avaliar a concentração inibitória mínima (CIM) e a concentração bactericida mínima (CBM) das misturas entre as substâncias e os ácidos. O timol isolado apresentou valores de CIM 1,5625 mg mL<sup>-1</sup> e CBM 6,25 mg mL<sup>-1</sup>; na presença de ácido cítrico a 1,625 mg mL<sup>-1</sup>, CIM e CBM foram de 0,391 mg mL<sup>-1</sup>. Para o terpinoleno isolado, CIM foi de 6,25 mg mL<sup>-1</sup>, e CBM, 12,5 mg mL<sup>-1</sup>; na presença do ácido láctico a 3,25 mg mL<sup>-1</sup>, CIM e CBM foram iguais a 0,78125 mg mL<sup>-1</sup>; na presença do ácido cítrico a 13,0 mg mL<sup>-1</sup>, foi necessária uma concentração de 3,125 mg mL<sup>-1</sup> para ambos os testes (CIM e CBM). Como os ácidos orgânicos já vêm sendo utilizados como aditivos zootécnicos na aquicultura, a adição de pequenas quantidades de timol e terpinoleno pode contribuir significativamente para controlar infecções, melhorando a saúde e o bem-estar dos animais (Bonin et al., 2021).

O extrato alcoólico da *Artemisia Annu*a apresentou atividade antimicrobiana contra patógenos de peixes (Soares et al., 2020a). Esse extrato foi incorporado em ração e utilizado na alimentação de tilápia-do-nylo. Os resultados foram muito promissores, pois houve uma melhora significativa no sistema imunológico, minimizando a resposta ao estresse e aumentando a resistência dos peixes quando desafiados contra *Aeromonas hydrophila* (Soares et al., 2020b). Essa formulação foi patenteada (BR10201902707), e recentemente (2021) a Embrapa Meio Ambiente firmou um contrato de inovação aberta com a empresa Terpenia Bioinsumos para testar a produção da ração em maior escala, a fim de avaliar sua viabilidade comercial.

## AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA DOS PRODUTOS NATURAIS

A avaliação ecotoxicológica mede o potencial de efeitos adversos dos bioinsumos para a biota dos compartimentos ambientais. Com relação ao compartimento

aquático, um parâmetro útil é a concentração de risco 5% ( $HC_5$ ). Esta é a concentração estimada que protege 95% das espécies em uma comunidade e pode ser prevista a partir de um pequeno número de dados toxicológicos (Traas; Van Leeuwen, 2007; Arambawatta-Lekamge et al., 2021). Nesse contexto, a distribuição de sensibilidade das espécies (SSD) considera a variação na sensibilidade à substância testada entre as espécies. Portanto, a SSD é uma ferramenta relevante na definição de padrões de qualidade no que diz respeito aos valores máximos de substâncias potencialmente tóxicas permitidas no ambiente, a fim de proteger a diversidade de espécies (Traas; Van Leeuwen, 2007; Jonsson et al., 2015).

Pesquisa realizada na Embrapa Meio Ambiente avaliou o risco ecotoxicológico para o compartimento aquático do óleo essencial de *Piper aduncum* L. (*Piperaceae*), planta conhecida popularmente como pimenta-de-macaco, sobre a qual se tem relatado ação terapêutica contra fungos, protozoários e infecções em geral, além de atuar como repelente (Dal Picolo et al., 2014; Mamood et al., 2017; Miura et al., 2021). O maior componente de seu óleo essencial é o dilapiol, composto que deve contribuir, em grande parte, para as atividades terapêuticas (Gáinza et al., 2016).

O óleo essencial das folhas de *P. aduncum* tem sido utilizado para tratar doenças de peixes (Queiroz, 2012; Corral et al., 2018), entretanto, há carência de informações quanto à sensibilidade de organismos aquáticos não visados (não alvo) a esse material. Tais organismos podem, eventualmente, entrar em contato com o óleo essencial quando utilizado para fins terapêuticos em produção da aquicultura ou quando os efluentes da aquicultura atingirem os corpos d'água nas áreas circundantes. Portanto, a avaliação ecotoxicológica é necessária para determinar os parâmetros para uso seguro do óleo essencial de *P. aduncum* (Bártíková et al., 2016).

A composição química da amostra de óleo essencial foi analisada, e seu  $HC_5$  foi determinado com base na toxicidade em seis organismos não alvo: uma microalga (*Pseudokirchneriella subcapitata*), sementes de alface (*Lactuca sativa* L.), um nematoide (*Panagrolaimus* sp.), dois microcrustáceos (*Daphnia magna* e *Artemia salina*) e um peixe (*Arapaima gigas*). Fatores de segurança foram aplicados ao  $HC_5$  a fim de estabelecer níveis de proteção para comunidades do meio aquático (Miura et al., 2021).

A cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-MS) permitiu a identificação de 18 compostos. O pico principal do cromatograma correspondeu ao dilapiol, que representou 75,5% da composição do óleo essencial, seguido por (E)- $\alpha$ -cariofileno (4,7%) e miristicina (4,2%).

O organismo mais sensível ao material-teste foi o microcrustáceo *D. magna*, com uma concentração efetiva média ( $CE_{50-48}$  h) de  $6,8 \text{ mg L}^{-1}$ , seguido por *A. salina*, *Panagrolaimus* sp., *P. subcapitata* e *L. sativa*. Estas duas últimas espécies apresentaram valores superiores a  $100 \text{ mg L}^{-1}$ , indicando que o óleo essencial é “praticamente não tóxico” para ambos os organismos.

Uma curva referente a uma função logística foi plotada de acordo com dados de toxicidade e a frequência acumulada, o que permitiu calcular um valor de  $HC_5$  equivalente a  $0,47 \text{ mg L}^{-1}$ . Entretanto, aplicando o fator de segurança,  $0,09 \text{ mg L}^{-1}$  de óleo essencial de *P. aduncum*, seria a concentração-limite segura no corpo d'água a ser adotada para a preservação da biota aquática.

Essa concentração pode ser considerada um resultado preliminar, pendente de posterior avaliação ecotoxicológica de outros organismos-alvo e uma gama mais ampla de composição química do óleo essencial de *P. aduncum* para melhorar a estimativa de risco (Miura et al., 2021).

## BIOINSUMOS DE ORIGEM VEGETAL DISPONÍVEIS NO BRASIL

O Brasil é um dos países que mais publica sobre propriedades bioativas de plantas e derivados, entretanto, esse sucesso não se reflete no registro de produtos botânicos no Brasil. Pelo contrário, o país destaca-se mundialmente pela morosidade e pelo alto custo do sistema regulatório para pesticidas (Isman, 2015, 2020).

O aplicativo Bioinsumos, resultado do Programa Nacional de Bioinsumos, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), que busca consolidar um catálogo nacional de bioinsumos para facilitar e promover o acesso a informações sobre os produtos disponíveis para uso e onde encontrá-los, foi desenvolvido em parceria com a Embrapa Informática Agropecuária. Por meio desse aplicativo, é possível encontrar apenas informações sobre os inoculantes e os produtos para controle de pragas registrados, que estão em conformidade com o conceito de bioinsumos para a agricultura orgânica e outros sistemas produtivos. A seguir, na Tabela 20.1, estão descritos os produtos à base de plantas contidos no aplicativo, além daqueles classificados como para agricultura orgânica no Agrofit (2021).

Além desses produtos já listados, ao realizar uma busca no Agrofit (2021) por inseticidas de classificação ambiental IV (produto pouco perigoso ao meio ambiente), é possível recuperar outros 12 inseticidas de origem vegetal: azadiractina (dois produtos), extrato de sementes de *Sophora flavescens* (um produto) e óleos vegetais (nove produtos). Esses produtos estão registrados para diferentes espécies de insetos e ácaros de diversas culturas (AGROFIT, 2021).

**Tabela 20.1.** Bioinsumos de origem vegetal para uso na agricultura orgânica registrados no Mapa (Agrofit, 2021)

Classe do produto	Marca	Empresa	Defensivo biológico	Registro no Mapa	Praga	
					Nome científico	Nome(s) comum(ns)
Inseticida (formicida)	Bioisca	Cooperativa dos cafeicultores e agropecuaristas (Cocapec)	Tefrósia (flavonas saponínicas do tipo rotenoides)	4712	<i>Atta laevigata</i>	Saúva cabeça de vidro; saúva de vidro
					<i>Atta sexdens rubropilosa</i>	Saúva limão; saúva vermelha
Inseticida e fungicida	Agroneem	Agrovant Comércio de Produtos Agrícolas Ltda.	Azadiractina (tetranortriterpenoide)	25118	<i>Bemisia argentifolli</i>	Mosca branca
					<i>Erysiphe polygoni</i>	Oídio do cajueiro; oídio do feijoeiro
Inseticida e fungicida	Azact CE	Luiz Arthur Curi e Silva Agronegócios – EPP	Azadiractina (tetranortriterpenoide)	8015	<i>Bemisia argentifolli</i>	Mosca branca
					<i>Bemisia tabaci</i>	Mosca branca
					<i>Erysiphe polygoni</i>	Oídio do cajueiro; oídio do feijoeiro
Inseticida e fungicida	Fitoneem	Dalneen Brasil Comércio de Produtos Agropecuários Ltda	Azadiractina (tetranortriterpenoide)	6718	<i>Bemisia argentifolli</i>	Mosca-branca
					<i>Bemisia tabaci</i>	Mosca-branca
					<i>Erysiphe polygoni</i>	Oídio do cajueiro; oídio do feijoeiro
Inseticida e fungicida	Bioexos	Biotrop Soluções Biológicas e Participações	Azadiractina (tetranortriterpenoide)	13820	<i>Erysiphe polygoni</i>	Oídio do cajueiro; oídio do feijoeiro
					<i>Bemisia tabaci</i>	Mosca branca
					<i>Bemisia argentifolli</i>	Mosca branca

Apesar da pouca quantidade de ingredientes ativos registrados, diversas recomendações utilizando preparações botânicas simples podem ser encontradas em páginas governamentais (Brasil, 2021), o que ressalta a necessidade de se trabalhar a questão do sistema regulatório para pesticidas de origem vegetal no país.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em razão dos problemas acarretados à saúde humana e ao meio ambiente pelo uso intensivo de agrotóxicos sintéticos, a busca por produtos alternativos e tecnologias mais saudáveis vem sendo fortemente demandada.

Embora existam inúmeros trabalhos na literatura reportando o uso de produtos de origem botânica como potentes bioinseticidas, pouquíssimos produtos de origem vegetal estão disponíveis comercialmente. Informações para registrar agrotóxicos classificados como produtos biológicos, bioquímicos e semioquímicos para uso na agricultura estão disponíveis em página do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento na internet<sup>1</sup>. Entre vários outros documentos, os seguintes são necessários: i) avaliação qualitativa e quantitativa da composição do produto, indicando a concentração do ingrediente ativo biológico e os limites máximos e mínimos dos demais componentes e suas funções específicas; e ii) informações sobre o modo de ação do produto sobre os organismos alvo. Como os princípios ativos dos produtos de origem botânica são normalmente compostos por um complexo conjunto de substâncias, o registro de produtos preparados a partir de plantas torna-se custoso, sendo um empecilho para as pequenas e médias empresas. Além disso, há necessidade de elaboração de uma nova instrução normativa conjunta (INC) (Mapa/Ibama/Anvisa) para normatizar diferenciadamente e simplificar o registro de produtos agrotóxicos de derivados vegetais.

Adicionalmente, muitos desses produtos de origem botânica apresentam alta suscetibilidade a fotodegradação, oxidação abiótica ou perda por volatilização e, portanto, apresentam pouca estabilidade quando aplicados em condições de campo. Para solucionar esse problema, a nanotecnologia vem sendo empregada como alternativa para aumentar a eficiência e a persistência desses produtos. Assim, pesquisas nesse sentido devem ser incentivadas e apoiadas.

Outro impedimento para a adoção de produtos à base de plantas é a necessidade de realizar o cultivo em larga escala dessas espécies vegetais para a obtenção dos compostos necessários. Nesse sentido, uma alternativa seria a utilização de compostos originados de partes vegetais descartadas de outras cadeias, como o óleo essencial obtido da casca dos frutos de citros. Outra opção é por meio do apoio aos pequenos e médios produtores para que cultivem as espécies de interesse de maneira sustentável, pois, assim, haverá maior renda para os produtores e menor dependência de insumos importados.

---

<sup>1</sup> Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/servicos/registrar-agrotoxicos-classificados-como-produtos-biologicos-microbiologicos-bioquimicos-e-semioquimicos-para-uso-na-agricultura>

Contudo, o Brasil tem um enorme potencial de crescimento no desenvolvimento de bioinsumos, pois abriga a maior biodiversidade do planeta e é, ao mesmo tempo, um dos maiores produtores de commodities do mundo.

Desde o lançamento do Programa Nacional de Bioinsumos em 2020, houve um significativo avanço no desenvolvimento e registro de novos bioinsumos, embora a maioria seja à base de produtos microbiológicos. Também se observou, no Brasil, grande avanço no volume de startups ligadas ao agronegócio. Assim, a solução para atender à demanda por novos bioinsumos é a partir da inovação aberta, que envolve não apenas startups, mas também parcerias em rede entre o setor privado com centros de pesquisa e universidades.

Com isso, espera-se contribuir para a inovação do agronegócio, agregando valor e aumento da produtividade; por meio da inovação aberta, aumentar o volume de startups e parcerias com empresas; agregar valor aos produtos de base científica, gerados pelos projetos de pesquisas desenvolvidas pela Embrapa, mas que precisam de validação e finalização antes de entrar para o mercado; por apresentar baixa toxicidade e ser biodegradável, esse tipo de produto promove a agricultura sustentável quando comparado com os defensivos agrícolas convencionais e não biológicos, aumentando a aceitação pela sociedade dos produtos agrícolas; por meio dos conceitos da bioeconomia, agregar valor sobre a exploração sustentável da biodiversidade brasileira, por meio do desenvolvimento e da oferta aos produtores de novos ativos de base biológica, reduzir os custos dos sistemas de produção, aumentar as margens de lucro, principalmente dos pequenos e médios produtores, desenvolver tecnologias cada vez mais sustentáveis em cima de um modelo cada vez mais local, regional do território e do bioma.

## REFERÊNCIAS

- ABD-ELGAWAD, A. M.; GENDY, A. E-N. G. E.; ASSAEED, A. M.; ROWAILY, S. L.; ALHARTHI, A. S.; MOHAMMED, T. A.; NASSAR, M. I.; DEWIR, Y.; ELSHAMY, A. I. Phytotoxic Effects of Plant Essential Oils: A Systematic Review and Structure-Activity Relationship Based on Chemometric Analyses. *Plants*, v.10(1), 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/plants10010036>.
- ABDOLAHY, A.; HASSANI, A.; GHOSTA, Y.; JAVADI, T.; MEKSHKATALSADAT, M. H. Essential oils as control agents of postharvest *Alternaria* and *Penicillium* rots on tomato fruits. *Journal of Food Safety*, v.30, p. 341-352, 2010.
- AGROFIT – Sistema de Agrotóxicos Fitossanitário, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2021. Disponível em: [http://agrofit.agricultura.gov.br/primeira\\_pagina/extranet/AGROFIT.html](http://agrofit.agricultura.gov.br/primeira_pagina/extranet/AGROFIT.html). Acesso em: 12 ago. 2021.
- AHSAEI, S. MOHAMMAD; TALEBI-JAHROMI, K.; AMOABEDINY, G. Insecticidal activity of polycaprolactone nanoparticles decorated with chitosan containing two essential oils against *Tribolium confusum*, *International Journal of Pest Management*, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/09670874.2020.1825875>.
- ALKILANI, A. Z.; HAMED, R.; AL-MARABEH, S.; KAMAL, A.; ABU-HUWAIJ, R.; HAMAD, I. Nanoemulsion-based film formulation for transdermal delivery of carvedilol. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, v. 46, p. 122-128, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jddst.2018.05.015>.
- ARAMBAWATTA-LEKAMGE, S. H.; PATHIRATNE, A.; RATHNAYAKE, V. N. Sensitivity of freshwater organisms to cadmium and copper at tropical temperature exposures: derivation of tropical freshwater ecotoxicity thresholds using species sensitivity distribution analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 211. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111891>.
- BAJAPI, V. K.; KANG, S. C. In vitro and In vivo inhibition of plant pathogenic fungi by essential oil and extracts of *Magnolia liliflora* Desr. *Journal of Agriculture and Science Technology*, v. 14, p. 845-856, 2012.
- BÁRTÍKOVÁ, H.; PODLIPNÁ, R.; SKÁLOVÁ, L. Veterinary drugs in the environment and their toxicity to plants. *Chemosphere* v. 144, p. 2290–2301, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.10.137>.
- BENELLI, G.; PAVELA, R.; MAGGI, F.; PATRELLI, R.; NICOLETTI, M. J. Commentary: Making Green Pesticides Greener? The Potential of Plant Products for Nanosynthesis and Pest Control. *Journal of Cluster Science*, v. 28, p. 3-10, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s10876-016-1131-7>.
- BENELLI, G.; PAVONI, L.; ZENI, V.; RICCIARDI, R.; COSCI, F.; CACOPARDO, G.; GENDUSA, S.; SPINOZZI, E.; PETRELLI, R.; CAPPELLACCI, L.; MAGGI, F.; PAVELA, R.; BONACUCINA, G. Developing a Highly Stable *Carlina acaulis* Essential Oil Nanoemulsion for Managing *Lobesia botrana*. *Nanomaterials*, v. 10, p. 1867, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/nano10091867>.
- BONIN, M. C. B.; PENTEADO, A. L.; QUEIROZ, S. C. N. Avaliação da atividade de misturas de ácidos orgânicos e substâncias isoladas de óleos essenciais frente à *Streptococcus agalactiae* In: 15º Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica – CIIC, 2021, Campinas, *Anais...Campinas: Embrapa Meio Ambiente*, 2021. p. 1-2.

- CELOTO, M. I. B.; PAPA, M. F. S.; SACRAMENTO, L. V. S.; CELOTO, F. J. Atividade antifúngica de extratos de plantas a *Colletotrichum gloeosporioides*. *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 30, n. 1, p. 1-5, 2008.
- CERDEIRA, A. L.; CANTRELL, C. L.; DAYAN, F. E.; BYRD, J. D.; DUKE, S. O. Tabanone, a New Phytotoxic Constituent of Cogongrass (*Imperata cylindrica*). *Weed Science*, v. 60, n. 2, p. 212-218, 2012.
- CORRAL, A. C. T.; DE QUEIROZ, M. N.; DE ANDRADE-PORTO, S. M.; MOREY, G. A. M.; CHAVES, F. C. M.; FERNANDES, V. L. A.; ONO, E. A.; AFFONSO, E. G. Control of *Hysterothylacium* sp. (Nematoda: Anisakidae) in juvenile pirarucu (*Arapaima gigas*) by the oral application of essential oil of *Piper aduncum*. *Aquaculture*, v. 494, p. 37-44, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.04.062>.
- CORREA, J. C. R.; SALGADO, H. R. N. Atividade inseticida das plantas e aplicações: revisão. *Revista Brasileira de Plantas Mediciniais*, v. 13, p. 500-506, 2011.
- DAL PICOLO, C.R., BEZERRA, M.P., GOMES, K.S.; PASSERO, L.F.D.; LAURENTI, M.D.; MARTINS, E.G.A.; SARTORELLI, P.; LAGO, J.H.G. Antileishmanial activity evaluation of adunchalcone, a new prenylated dihydrochalcone from *Piper aduncum* L. *Fitoterapia*, v. 97, p. 28-33, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.fitote.2014.05.009>.
- DAYAN, F. E.; CANTRELL, C. L.; DUKE, S. O. Natural products in crop protection. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, v. 17, p. 4022-4034, 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.bmc.2009.01.046>.
- DAYAN, F. E.; DUKE, S. O. Discovery for New Herbicide Sites of Action by Quantification of Plant Primary Metabolite and Enzyme Pools. *Engineering*, v. 6, n. 5, p. 509-514, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.eng.2020.03.004>.
- DAYAN, F. E.; HERNANDEZ, A.; ALLEN, S. N.; MORAES, R. M.; VROMAN, J. A.; AVERY, M. A.; DUKE, S. O. Comparative phytotoxicity of artemisinin and several sesquiterpene analogues. *Phytochemistry*, v. 50, p. 607-614, 1999. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S0031-9422\(98\)00568-8](https://dx.doi.org/10.1016/S0031-9422(98)00568-8).
- DEQUECH, S. T. B.; SAUSEN, C. D.; LIMA, C.G.; EGEWARTH, R. Efeito de extratos de plantas com atividade inseticida no controle de Stal (Col.: Chrysomelidae), em laboratório. *Revista Biotemas*, Santa Maria, p. 22-31, 2008.
- DORIGHELLO, D.V.; BETTIOL, W.; MAÍÁ, N.B.; LEITE, R.M.V.B.C. Controlling Asian soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) with *Bacillus* spp. and coffee oil. *Crop Protection*, v. 67, p. 59-65, 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2014.09.017>.
- DUKE, S. O.; COPPING, L. G. Natural products that have been used commercially as crop protection agents. *Pest Management Science*, v. 63, p. 524-554, 2007. DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/ps.1378>.
- DUKE, S. O.; DAYAN, F. E.; RIMANDO, A. M. Natural products as tools for weed management. *Proceedings of the Japanese Weed Science Society*, suppl. 1, p. 1-11, 1998.
- DUKE, S. O.; DAYAN, F. E.; RIMANDO, A. M. SCHRADER, K. K.; ALIOTTA, G.; OLIVA, A.; ROMAGNI, J. G. Chemicals from nature for weed management. *Weed Science*, v.50, 138-151, 2002. DOI: [https://dx.doi.org/10.1614/0043-1745\(2002\)050\[0138:IPCFNF\]2.0.CO;2](https://dx.doi.org/10.1614/0043-1745(2002)050[0138:IPCFNF]2.0.CO;2).

ELSHAFIE, H. S.; CAMELE, I. Investigating the effects of plant essential oils on postharvest fruit decay. In: Sultan, Sadia. **Fungal pathogenicity**. IntechOpen, 2016. Cap. 5. DOI: <https://dx.doi.org/10.5772/62568>.

ELSHAFIE, H.S.; MANCINI, E.; DE MARTINO, L.; PELLEGRINO, C.; DE FEO, V.; CAMELE, I. Antifungal activity of some constituents of *Origanum vulgare* L. essential against post-harvest disease of peach fruit. **Journal of Mediterranean Food**, v.18, n.8, p. 929-934, 2015.

FORIM, M. R.; COSTA, E. S.; SILVA, M. F. G. F.; FERNANDES, J. B.; MONDEGO, J. M.; BOIÇA JUNIOR, A. L. Development of a New Method To Prepare Nano-/microparticles Loaded with Extracts of *Azadirachta indica*, Their Characterization and Use in Controlling *Plutella xylostella* J. **Agric. Food Chem.**, v. 61, p. 9131-9139, 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/jf403187y>.

FRANZENER, G.; STANGARLIN, J. R.; SCHWAN-ESTRADA, K. R. F.; CRUZ, M. E. S. Atividade antifúngica e indução de resistência em trigo a *Bipolaris sorokiniana* por *Artemisia camphorata*. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 25, n. 2, p. 503-507, 2003. DOI: <https://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v25i2.2124>.

GAÍNZA, Y.A.; FANTATTO, R.R.; CHAVES, F.C.L.; BIZZO, H.R.; ESTEVES, S.N.; CHAGAS, A.C.S. *Piper aduncum* against *Haemonchus contortus* isolates: cross resistance and the research of natural bioactive compounds. **Brazilian Journal of Veterinary Parasitology**, v. 25, p. 383-393, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S1984-29612016073>.

GODOY, C. V. Risk and management of fungicide resistance in the Asian soybean rust fungus *Phakopsora pachyrhizi* In: THIND, T.S. (Ed.). **Fungicide resistance in crop protection: risk and management**. London: CABI, 2012. p. 87-95. DOI: <https://dx.doi.org/10.1079/9781845939052.0087>.

GODOY, C. V.; SEIXAS, C. D. S.; SOARES, R. M.; MARCELINO-GUIMARÃES, F. C.; MEYER, M. C.; COSTAMILAN, L. M. Asian soybean rust in Brazil: past, present, and future. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 407-421, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2016000500002>.

GODOY, C. V.; UTIAMADA, C. M.; MEYER, M. C.; CAMPOS, H. D.; FORCELINI, C. A.; PIMENTA, C. B.; CASSETARI NETO, D.; JACCOUD FILHO, D. S.; BORGES, E. P.; ANDRADE JUNIOR, E. R. de; SIQUERI, F. V.; JULIATTI, F. C.; FEKSA, H. R.; GRIGOLLI, J. F. J.; NUNES JUNIOR, J.; CARNEIRO, L. C.; SILVA, L. H. C. P. da; SATO, L. N.; CANTERI, M. G.; MADALOSSO, M.; GOUSSAIN, M.; MARTINS, M. C.; BALARDIN, R. S.; FURLAN, S. H.; MONTECELLI, T. D. N.; CARLIN, V. J.; VENANCIO, W. S. **Eficiência de fungicidas para o controle da ferrugem asiática da soja, Phakopsora pachyrhizi**, na safra 2014/15: resultados sumarizados dos ensaios cooperativos. Embrapa Soja: Londrina, 2015. 6 p. (Embrapa Soja. Circular técnica, III).

HENKEL, T; BRUNNE, R. M.; MULLER, H.; REICHEL, F. Statistical investigation into the structural complementarity of natural products and synthetic compounds. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 38, p. 643-647, 1999. DOI: [https://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3773\(19990301\)38:5<643::AID-ANIE643>3.0.CO;2-G](https://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1521-3773(19990301)38:5<643::AID-ANIE643>3.0.CO;2-G).

ISMAN, M. B. A renaissance for botanical insecticides? **Pest Management Science**, v. 71, p. 1587-1590, 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/ps.4088>.

ISMAN, M. B. Bridging the gap: Moving botanical insecticides from the laboratory to the farm. **Industrial Crops & Products**, v. 110, p. 10-14, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.07.012>.

- ISMAN, M. B. 2020. Botanical Insecticides in the Twenty-First Century—Fulfilling Their Promise? **Annual Review of Entomology** 65:233-249. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011019-025010>. Acesso em: 11 ago. 2021.
- JONSSON, C. M.; SILVA, M. S. G. M.; MACEDO, V. S.; DANTZGER, D. D.; VALLIM, J. H.; MARIGO, A. L. S.; AOYAMA, H. Prediction of a low-risk concentration of diflubenzuron to aquatic organisms and evaluation of clay and gravel in reducing the toxicity. **Pan American Journal of Aquatic Sciences**, v. 10, p. 259-272, 2015.
- KANAOK, N.; FIUZA, L. M. Potencial dos óleos essenciais de plantas no controle de insetos e microrganismos. **Neotropical Biology and Conservation**, v. 5, p. 120-132, 2010. DOI: <https://dx.doi.org/10.4013/nbc.2010.52.08>.
- KHAN, S.; TANING, C. N. T.; BONNEURE, E.; MANGELINCKX, S.; SMAGGHE, G.; SHAH, M. M. Insecticidal activity of plant-derived extracts against different economically important pest insects. **Phytoparasitica**, v. 45, p. 113-124, 2017.
- KHAN, S.; TANING, C. N. T.; BONNEURE, E.; MANGELINCKX, S.; SMAGGHE, G.; AHMAD, R.; FATIMA, N. ASIF, M.; SHAH, M. M. Bioactivity-guided isolation of rosmarinic acid as the principle bioactive compound from the butanol extract of *Isodon rugosus* against the pea aphid, *Acyrtosiphon pisum*. **Plos One**, 24 Junho, p. 1-10, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0215048>.
- KUMAR, S.; BHANJANA, G.; SHARMA, A.; SIDHU, M. C.; DILBAGHI, N. Synthesis, characterization and on field evaluation of pesticide loaded sodium alginate nanoparticles, **Carbohydrate Polymers**, v. 101, p. 1061-1067, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.10.025>.
- LAZAR-BAKER, E. E.; HETHERINGTON, S. D.; KU, V. V.; NEWMAN, S. W. Evaluation of commercial essential oil samples on the growth of post-harvest pathogen *Monilinia fructicola* (G. Winter) Honey. **Lett. Applied Microbiology**, v. 52, p. 227-232, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/j.1472-765X.2010.02996.x>.
- LINDEL, S. D.; PATTENDEN, L. C.; SHANNON, J. Combinatorial chemistry in agrosociences. **Bioorganic & Medicinal Chemistry**, v. 17, p. 4035-4046. 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.bmc.2009.03.027>.
- MALTROSE, N.A.; OBIKEZE, K.; BELAY, A.A.; CLAEF, O.J. Plant extracts and other natural products and other natural compounds as alternatives for post-harvest management of fruit fungal pathogens: A review. **Food Bioscience**, v. 41, p. 1-15, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100840>.
- MAMOOD, S. N.; HIDAYATULFATHI, O.; BUDIN, S. B.; AHMAD ROHI, G.; ZULFAKAR, M. H. The formulation of the essential oil of *Piper aduncum* Linnaeus (Piperales: Piperaceae) increases its efficacy as an insect repellent. **Bulletin of the Entomological Research**, v. 107, p. 49-57, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1017/S0007485316000614>.
- MANCINI, E.; CAMELE, I.; ELSHAFIE, H.S.; DE MARTINO, L.; PELEGRINO, C.; GRULOVA, D.; DE FEO, V. Chemical composition and biological activity of essential oil of *Origanum vulgare* spp. hirtum from different areas in the southern Apennines (Italy). **Chemistry & Biodiversity**, v. 11, n.4, p. 639-651, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/cbdv.201300326>.
- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Fichas Agrecológicas, Sanidade Vegetal. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/organicos/fichas-agroecologicas/sanidade-vegetal>. Acesso em: 13 ago. 2021.

- MARINHO-PRADO, J.S.; MORAIS, L.A.S.; PAZIANOTTO, R.A.A. 2019. Efeito deletério de óleos essenciais sobre *Anticarsia gemmatalis* e *Helicoverpa armigera*. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, 87, Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP. 26 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1115015/efeito-deleterio-de-oleos-essenciais-sobre-anticarsia-gemmatalis-e-helicoverpa-armigera>. Acesso em: 26 jul. 2021.
- MARINHO-PRADO, J.S.; QUEIROZ, S.C.N.; PRADO, S.S.; ASSIS, M.C. 2018. Bioatividade de extratos de plantas sobre lagartas de *Anticarsia gemmatalis* e *Helicoverpa armigera*. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, 78, Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP. 26 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1095015/bioatividade-de-extratos-de-plantas-sobre-lagartas-de-anticarsia-gemmatalis-e-helicoverpa-armigera>. Acesso em: 26 jul. 2021.
- MIRESMALLI, S.; ISMAN, M. B. Botanical insecticides inspired by plant-herbivore chemical interactions. **Trends in Plant Science**, v. 19, n. 1, p. 29-35, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2013.10.002>.
- MIURA, P. T.; JONSSON, C. M. ; QUEIROZ, S. C. N. ; CHAGAS, E. C. ; CHAVES, F. C. M. ; REYES, F. G. R. Ecological risk assessment of *Piper aduncum* essential oil in non-target organisms. **Acta Amazonica**, v. 51, p. 71-78, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/1809-4392202002691>.
- MIZOBUCHI, A. L.; DA SILVA, D. R.; DE ASSIS, M. C.; MELO, I. S.; QUEIROZ, S. C. N. Avaliação da atividade antifúngica de óleos essenciais contra *Magnaporthe grisea* e *Fusarium graminearum*. In: 11º Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica – CIIC, 2017, Campinas, **Anais...Campinas: Embrapa Meio Ambiente**, 2017, p. 1-10.
- MOLISH, H. **Der einfluss einer Pflanze auf die andere-Allelopathic**. Jena: Gustav Fisher Verlag, 1937.
- MONTEIRO, R. A.; CAMARA, M. C.; OLIVEIRA, J. L.; CAMPOS, E. V. R.; CARVALHO, L. B.; PROENÇA, P. L. F.; GUILGER-CASAGRANDE, M.; LIMA, R.; NASCIMENTO; J.; GONÇALVES, K. C.; POLANCZYK, R. A.; FRACETO, L. F., Zein based-nanoparticles loaded botanical pesticides in pest control: An enzyme stimuli-responsive approach aiming sustainable agriculture. **Journal of Hazardous Materials**, v. 417, p. 126004, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126004>.
- MORAES, R. M.; CERDEIRA, A. L.; DUKE, S. O.; CANTRELL, C. L.; QUEIROZ, SONIA C. N. **Pesticidas Naturais Derivados de Plantas: Descoberta e Usos. Defensivos Agrícolas Naturais - Uso e Perspectivas**. ed. Jaguariúna: Embrapa, 2016, p. 505-541.
- MUNHUWEYI, K., CALEB, O.J., LENOXX, C. L., VAN REENEN, A. J., OPARA, U. L. *In vitro* and *in vivo* antifungal activity of chitosan-essential oils against pomegranate fruit pathogens. **Postharvest Biology and Technology**, v. 129, p. 9-22, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.postharvbio.2017.03.002>.
- ORŠOLIĆ, D.; PEHAR, V.; ŠMUC, T.; STEPANIĆ, V. Comprehensive machine learning based study of the chemical space of herbicides. **Scientific Reports**, v. 11, p. 11479, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/s41598-021-90690-w>.
- PARÉ, P. W.; ZAJICEK, J.; FERRACINI, V. L.; MELO, I. S. Antifungal terpenoids from *Chenopodium ambrosioides*. **BIOCHEMICAL SYSTEMATICS AND ECOLOGY**, v. 21, n. 617, p. 649-653, 1993.
- PENTEADO, A. L.; ESCHIONATO, R. A.; DE SOUZA, D. R. C.; QUEIROZ, S. C. N. Avaliação *in vitro* de atividade antimicrobiana de óleos essenciais contra *Salmonella typhimurium* e *Staphylococcus aureus*. **Revista Higiene Alimentar**. 2021.

PORTO, R. S.; RATH, S.; QUEIROZ, S. C. N. *Conyza canadensis*: Green Extraction Methods of Bioactive Compounds and Evaluation of Their Antifungal Activity. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, p. 1-7, 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20160228>.

QUEIROZ, M. N. 2012. Efeito do extrato aquoso da *Piper aduncum* L no controle de parasitas monogenéticos (*Platyhelminthes: Monogenoidea*) e parâmetros fisiológicos do pirarucu *Arapaima gigas* (SCHINZ 1822). **Dissertação de Mestrado em Agricultura**, INPA/Uninilton, Manaus, Amazonas, 2012. 84p.

QUEIROZ, S. C. N.; CANTRELL, C. L.; DUKE, S. O.; WEDGE, D. E.; NANDULA, V. K.; MORAES, R. M.; CERDEIRA, A. L. Bioassay-Directed Isolation and Identification of Phytotoxic and Fungitoxic Acetylenes from *Conyza canadensis*. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 60, p. 5893-5898, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/jf3010367>.

RAHMAN, M. U.; GUL, S. *Mycotoxic Effects of Thymus serpyllum oil on the asexual reproduction of Aspergillus species*. **Journal of Essential Oils**, v. 15, 166-171, 2003. DOI: <https://dx.doi.org/10.1080/10412905.2003.9712104>.

RICE, E. L. Allelopathy. New York: **Academic Press**, 1974. 353 p.

RICE, E. L. Allelopathy. 2. ed. Orlando: **Academic Press**, 1984. 422 p.

SEIBER, J. N.; COATS, J.; DUKE, S. O.; GROSS, A. D. Biopesticides: State of Art and Future Opportunities. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v. 62, p. 11613-11619, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/jf504252n>.

SILVA-BUZANELLO, R. A.; FERRO, A. C.; BONA, E.; CARDOSO-FILHO, L.; ARAÚJO, P. H. H.; LEIMANN, F. V.; GONÇALVES, O. H. Validation of an Ultraviolet-visible (UV-Vis) technique for the quantitative determination of curcumin in poly(L-lactic acid) nanoparticles. **Food Chemistry**, v. 172, p. 99-104, 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.016>.

SINGH, R. P.; HANDA, R.; MANCHANDA, G. Nanoparticles in sustainable agriculture: An emerging opportunity. **Journal of Controlled Release**, v. 329, p. 1234-1248. 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.051>.

SOARES, M. P.; CARDOSO, I. L.; ISHIKAWA, M. M.; OLIVEIRA, A. S. S.; SARTORATTO, A.; JONSSON, C. M.; QUEIROZ, S. C. N.; DUARTE, M. C.; RANTIN, F. T.; SAMPAIO, F. G. Effects of *Artemisia annua* alcohol extract on physiological and innate immunity of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to improve health status. **Fish & Shellfish Immunology**, v. 105, p. 369-377, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.fsi.2020.07.035>.

SOARES, M. P.; PINHEIRO, V. R.; CARDOSO, I. L.; OLIVEIRA, A. S. S.; SARTORATTO, A.; ISHIKAWA, M. M.; JONSSON, C. M.; DUARTE, M. C. RANTIN, F. T.; SAMPAIO, F. G.; *In vitro antibacterial activity of ethanol extract of Artemisia annua and its bioactive fractions against fish pathogens*. **Aquaculture Research**, v.52, p. 1797-1801, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1111/are.15026>.

SOUZA, A. E. F.; ARAÚJO, E.; NASCIMENTO, L. C. Atividade antifúngica de extratos de alho e capim-santo sobre o desenvolvimento de *Fusarium proliferatum* isolado de grãos de milho. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 6, p. 465-471, 2007. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/S0100-41582007000600003>.

SPLETOZER, A.G.; SANTOS, C.R. DOS; SANCHES, L.A.; GARLET, J. 2021. Plantas com potencial inseticida: enfoque em espécies amazônicas. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 2, p. 974-997. DOI: <https://dx.doi.org/10.5902/1980509832244>.

STADNIK, M. J.; BETTIOL, W.; SAITO, M. L. Bioprospecting for plant and fungus extracts with systemic effect to control the cucumber powdery mildew. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 110, p. 383-393, 2003.

STADNIK, M. J.; BETTIOL, W. Association between lipoxygenase and peroxidase activity and systemic protection of cucumber plants against *Podospaera xanthii* induced by *Oudemansiella canarii* extracts. **Journal of Plant Diseases and Protection**. v. 114, p. 9-13. 2007.

STOYTICHEVA, M. **Pesticides in the Modern World: Effects of Pesticides Exposure**. Croatia: InTechOpen, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.5772/943>.

SWANTON, C. J.; MASHHADI, H. R.; SOLOMON, K. R.; AFIFI, M. M., DUKE, S. Similarities between the discovery and regulation of pharmaceuticals and pesticides: in support of a better understanding of the risks and benefits of each. **Pest Manag Sci**, v. 67, p. 790-797, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/ps.2179>.

TABAN, A.; SAHARKHIZ, M. J.; NADERI, R. A natural post-emergence herbicide based on essential oil encapsulation by cross-linked biopolymers: characterization and herbicidal activity. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 36, p. 45844-45858, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s11356-020-10405-y>.

TERAO, D., QUEIROZ, S. C. N., NECHET, K. L., HALFELD-VIEIRA, B. A. **Métodos de controle alternativo do bolor-verde em laranja**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 18 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos 125), 2020.

TRAAS, T. P.; VAN LEEUWEN, C. J. Ecotoxicological effects. In VAN LEEUWEN, C. J.; VERMEIRE, T. G., eds, **Risk Assessment of Chemicals: An Introduction**, 2nd ed. Springer, Dordrecht, The Netherlands, p. 281-356, 2007.

UMETSU, N.; SHIRAI, Y. Development of novel pesticides in the 21 st century, **J. Pest. Sci.**, v. 45, p. 54-74, 2020). DOI: <https://dx.doi.org/10.1584/jpestics.D20-201>.

YANG, F.-L.; LI, X.-G.; ZHU, F.; LEI, C.-L. Structural Characterization of Nanoparticles Loaded with Garlic Essential Oil and Their Insecticidal Activity against *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). **J. Agric. Food Chem**. v. 57, p. 10156-10162, 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/jf9023118>.

YU, C. S.; WANG, Q.; BAJSA-HIRSCHL, J.; CANTRELL, C. L.; Duke, S. O.; Liu, X-H. Synthesis, Crystal Structure, Herbicidal Activity, and SAR Study of Novel N-(Arylmethoxy)-2-chloronicotinamides Derived from Nicotinic Acid. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 69, n. 23, p. 6423-6430, Jun 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.0c07538>.

ZHOU, C.; LUO, X.; CHEN, N.; ZHANG, L.; GAO, J. C-P Natural Products as Next-Generation Herbicides: Chemistry and Biology of Glufosinate. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 68, n. 11, p. 3344-3353, Mar 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.0c00052>.

WANG, Y., ZHANG, L., FENG, Y., ZHANG, D., GUO, S., PANG, X. Comparative evaluation of the chemical composition and bioactivities of essential oils from four spice plants (Lauraceae) against stored-product insects. **Industrial Crops and Products**. v. 140, p. 111640, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/>

WHO - World Health Organization. **Antimicrobial resistance**. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/antimicrobial-resistance>. Acesso em 30 ago. 2021.



# OGM E AGRICULTURA – A CIÊNCIA NA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS

*Deise Maria Fontana Capalbo, Eliana Maria Gouveia Fontes, Josias Correa de Faria, Paulo Ernesto Meissner Filho, Mônica Cibele Amancio, Maria José Amstalden Moraes Sampaio, André Nepomuceno Dusi, Mariangela Hungria, Marília Regini Nuti e Edson Watanabe*

## INTRODUÇÃO

Desde que a primeira planta transgênica foi obtida com sucesso em 1983<sup>1</sup>, a tecnologia dos organismos geneticamente modificados (OGM) tornou-se alvo de intensas discussões, tanto em nível internacional como nacional. Ao mesmo tempo que essa tecnologia era vista como chave para um novo padrão de desenvolvimento econômico, importantes questões, como a avaliação de possíveis impactos sobre a saúde humana e, principalmente, sobre o meio ambiente, com o controle dessa tecnologia por meio de regras transparentes e eficientes de biossegurança, assumiram um papel estratégico nas discussões sobre o assunto.

Com a missão de viabilizar soluções de pesquisa, desenvolvimento e inovação para a sustentabilidade da agricultura em benefício da sociedade brasileira, a Embrapa começou a trabalhar com o tema ainda no início dos anos 1980, sendo pioneira nessa área no Brasil. No início dos anos 2000, cinco produtos geneticamente modificados destacavam-se no portfólio de ativos tecnológicos sendo desenvolvidos pela Empresa (soja, algodão, batata, feijão e mamão). Vigorava, à época, a Lei nº 8.974/95 (Lei de Biossegurança), alterada pela Medida Provisória nº 2.191-9/2001 e seu decreto (Decreto nº 1.752/95), que regulamentava os trabalhos com OGM no Brasil, mas ela era desafiada por diversas disputas legais, com vieses ideológicos e políticos. Protocolos científicos que pudessem atender às questões de biossegurança que se apresentavam estavam ainda em discussão ou inexistiam.

---

<sup>1</sup> A primeira planta transgênica foi uma planta de fumo contendo sequências de DNA da bactéria *Escherichia coli*, obtida por Patrícia Zambryski e seus colegas da Alemanha e Bélgica. No ano seguinte, Robert Horsch e seus colegas da empresa norte-americana Monsanto obtiveram plantas de fumo contendo um gene para resistência a antibióticos (Aragão, 2003).

A Embrapa precisava avançar com suas pesquisas com OGM (algumas das quais estavam em estágio de campo experimental), atender às normativas legais vigentes à época (que em muitos pontos se revelavam bastante complexas) e, ao mesmo tempo, garantir que o avanço seria seguro. Era premente uma maior aproximação entre a pesquisa, a regulamentação e a governança do tema na Empresa. A Embrapa estava também reestruturando seu modelo de gestão de projetos para responder a desafios mais complexos que se anteviam. O momento era de desafio, mas, ao mesmo tempo, oportuno para que se integrassem os conhecimentos científicos – dispersos em seus vários centros de pesquisa – necessários para garantir a segurança dos OGM de maneira robusta e com base na ciência.

Dos cinco produtos geneticamente modificados que se destacavam, quatro se encontravam em estágio mais adiantado de desenvolvimento (batata, feijão, mamão e soja) e um apresentava desafios regulatórios ambientais mais complexos (algodão), sendo que duas eram as perguntas mais constantes a serem respondidas ao público em geral: os OGM são seguros aos seres humanos? Os OGM são seguros ao meio ambiente? Foi então que um grupo de pesquisadores com visão de trabalho em equipe propôs e viu aprovado, em 2002, projeto de pesquisa que serviria de base para desenvolver os aspectos de biossegurança dos OGM que a Empresa tinha como destaque em seu portfólio de projetos. Coordenada pela Embrapa Meio Ambiente, utilizando um formato de gestão inovador na época – Comitê Gestor e Líderes Temáticos (por produto OGM e por grande área: Meio Ambiente e Alimentos) – e em sincronia e estreita comunicação com a equipe regulatória da Sede da empresa, a Rede BioSeg (como ficou conhecida) propôs-se a discutir quais as perguntas necessárias para garantir a segurança, quais as de interesse científico complementares mas não essenciais ao processo de desregulamentação e quais seriam inviáveis de serem respondidas à luz do conhecimento científico e metodológico disponíveis.

Este capítulo foi estruturado considerando a importância da estruturação dessa rede, do desenvolvimento e/ou da validação de metodologias confiáveis e coerentes, da integração de conhecimentos até então pouco integrados na própria Embrapa e dos resultados obtidos. Ele revê o histórico regulatório e científico da biossegurança dos OGM no Brasil, indica os problemas que a proposta de cada OGM se propunha a resolver e os principais resultados obtidos. Com uma visão abrangente do processo, a Rede BioSeg desenvolveu seu trabalho com base em ciência e pela ciência, entendendo a regulamentação, auxiliando na construção do novo marco regulatório e oferecendo segurança para as respostas apresentadas.

## PESQUISA E REGULAMENTAÇÃO DE OGM NO MUNDO

Durante milhares de anos, os humanos utilizaram métodos de modificação genética, como cruzamentos ou seleção de indivíduos em populações, para obtenção de

plantas e animais com características mais desejáveis. A maioria dos alimentos que consumimos foi criada por meio desses métodos tradicionais, sendo que os resultados dependem sempre do tempo de geração das espécies alvo.

Depois que Herbert Boyer e Stanley Cohen, com auxílio de outros cientistas pioneiros da engenharia genética, inseriram o DNA de uma bactéria em outra, em 1973 (Cohen et al., 1973), foi possível fazer mudanças semelhantes de uma maneira mais específica de um organismo vivo e em um período mais curto. Em 1975, a comunidade científica presente na reunião de Asilomar, Califórnia, argumentou que, além dos benefícios, essa tecnologia poderia representar alguns riscos (Berg et al., 1974), e recomendou um conjunto de diretrizes sobre o uso cauteloso de tecnologia recombinante e quaisquer produtos dela resultantes (Berg et al., 1975). Este é considerado o início dos marcos regulatórios referentes à engenharia genética. As recomendações de Asilomar eram voluntárias, mas desde 1976 diferentes órgãos regulatórios norte-americanos implementaram normativas que tornaram as pesquisas com DNA recombinante<sup>2</sup> rigidamente regulamentadas (McHughen; Smyth, 2008).

Em 1982, a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD) divulgou um relatório sobre os riscos potenciais da liberação de OGM no meio ambiente quando as primeiras plantas geneticamente modificadas (GM) estavam sendo desenvolvidas (Bull et al., 1982; U.S.A., 1986). À medida que a tecnologia avançou e os OGM mudaram de organismos modelo para produtos comerciais em potencial, os Estados Unidos e outros países passaram a detalhar a avaliação da segurança desses produtos. Os conceitos básicos para a avaliação da segurança de alimentos derivados de OGM foram desenvolvidos em estreita colaboração sob os auspícios da OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development, 1992, 2003, 2017), da Organização Mundial da Saúde (OMS) e da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (Food and Agriculture Organization – FAO) (FAO, 1991). O relatório de 1993 recomenda a avaliação de segurança de um alimento GM caso a caso, por meio da comparação com um alimento correspondente, não GM, com um longo histórico de uso seguro. Esse conceito básico foi refinado em ações subsequentes, e a OECD em particular assumiu a liderança na aquisição de dados e no desenvolvimento de padrões para alimentos convencionais a serem utilizados na avaliação da equivalência substancial<sup>3</sup>. Essa avaliação baseia-se na ideia de que alimentos já existentes podem servir como base para a comparação do alimento geneticamente modificado

---

<sup>2</sup> DNA recombinante é a denominação dada às moléculas de DNA que têm parte de DNA derivados de duas ou mais fontes, as quais, normalmente, são espécies diferentes.

<sup>3</sup> <https://www.oecd.org/env/ehs/biotrack/consensusdocumentsfortheworkonharmonisationofregulatoryoversightinbiotechnology.htm>

(GM). É feita uma avaliação comparativa dos aspectos agronômicos, composição química e efeitos biológicos entre o alimento convencional e o GM. A aplicação do princípio da equivalência substancial auxilia na identificação de similaridades e possíveis diferenças entre o alimento convencional e o novo produto, que é, então, submetido a avaliação toxicológica posterior (Lajolo; Nutti, 2011).

Nos anos 1990, a preocupação ambiental evoluiu, e em 1992 foi finalizada a Convenção sobre Diversidade Biológica (Convention on Biological Diversity – CBD) e aberta para assinatura na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento no Rio de Janeiro. Entrou em vigor em 29 de dezembro de 1993, mostrando-se como o principal instrumento internacional para tratar de questões de biodiversidade<sup>4</sup>. O art. 19 da CDB discute especificamente a questão da gestão da biotecnologia e distribuição de seus benefícios: No intuito de dar cumprimento ao disposto no § 3º desse artigo, que estabelece a necessidade de procedimentos adequados no que diz respeito a transferência, manipulação e utilização seguras de todo organismo vivo modificado pela biotecnologia que possa ter efeito negativo na conservação e na utilização sustentável da diversidade biológica, as partes contratantes desta convenção negociaram um protocolo sobre biossegurança, conhecido como Protocolo de Cartagena sobre Biossegurança (PCB)<sup>5</sup>, que foi adotado em 2000 e entrou em vigor em 2003. Em julho de 2021, 198 países já tinham aderido ao Protocolo<sup>6</sup> e muitos outros o utilizam como ponto de referência para seus próprios regulamentos.

Do ponto de vista do contexto internacional, a CBD e o PCB são os principais elementos que influenciam diretamente o grau de desenvolvimento dos OGM. Entretanto, outros elementos também devem ser levados em consideração no ambiente institucional internacional, como as normas estabelecidas no âmbito do Codex Alimentarius<sup>7</sup>. Em 2003, o Codex Alimentarius adotou um conjunto de “Princípios e Diretrizes sobre alimentos derivados da biotecnologia” para ajudar os países a coordenar e padronizar a regulamentação dos alimentos GM, para garantir a segurança jurídica e facilitar o comércio internacional.

---

<sup>4</sup> Até o momento, 196 países fazem parte da Convenção, entre eles o Brasil, que internalizou seu texto mediante o Decreto Legislativo nº 2/1994. Cf. site da Convenção de Diversidade Biológica: <http://www.cbd.int/convention/parties/list>

<sup>5</sup> <https://www.cbd.int/doc/legal/cartagena-protocol-en.pdf>

<sup>6</sup> <https://bch.cbd.int/protocol/parties/>

<sup>7</sup> O Codex Alimentarius não é uma organização internacional em si, como a OMS ou a FAO, ambas organizações internacionais ligadas à ONU. O Codex pode ser definido como um corpo normativo que fixa regras de padrões alimentares para produtos alimentares individuais, rotulagem de alimentos, recomendações sobre resíduos de agrotóxicos, níveis de aditivos e contaminantes de alimentos, códigos de práticas higiênicas, entre outros aspectos da qualidade e segurança dos alimentos, que devem ser seguidas pelos países membros da ONU, dentre eles o Brasil.

Enquanto a OECD e outros organismos discutiam a segurança dos OGM à saúde humana desde a década de 1980, pouco se discutia, de maneira harmonizada, sobre sua segurança ambiental. A análise da segurança ambiental não deveria ser conduzida segundo modelos empregados para análise de produtos químicos lançados no meio ambiente, pois carecia de proposta mais integrativa. Por outro lado, não havia unanimidade para os estudos de segurança ambiental.

Assim era o quadro regulatório internacional envolvendo os aspectos de biossegurança de OGM, em 2002, quando a Rede BioSeg foi aprovada.

## Regulamentação de OGM no Brasil

A pesquisa, o desenvolvimento e a comercialização de OGM no Brasil seguiram o mesmo padrão polêmico que as discussões no âmbito internacional e enfrentaram diferentes desafios, tanto de ordem legal quanto de percepção pública. Por outro lado, o Brasil conta com um dos mais avançados marcos regulatórios envolvendo a questão da biossegurança de OGM do mundo, sendo a pesquisa com OGM no país regulada passo a passo, desde 1995, quando foi editada a primeira norma a tratar da questão da biossegurança no país (Lei nº 8.974/1995). Essas normas criaram a Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio).

Todavia, a partir de 1998 surgiram problemas relativos à aplicação da Lei de Biossegurança, quando ocorreu a primeira aprovação comercial, pela CTNBio, de um OGM no Brasil, a soja GM tolerante ao herbicida à base de glifosato (a chamada “soja Round Ready” ou soja RR), de propriedade da empresa Monsanto do Brasil Ltda (Menasche, 2005). A partir dessa aprovação, o Greenpeace e o Instituto de Defesa do Consumidor (IDEC) entraram com um processo na Justiça Federal contra a empresa Monsanto e o Governo Federal, questionando a competência da CTNBio para liberar o cultivo de GM sem observar as disposições da legislação ambiental, em especial, o disposto na Lei nº 6.938/81 e no Anexo da Lei nº 10.165/2000. Uma série de questionamentos a respeito da eficácia da legislação de biossegurança brasileira foi levantada, resultando na abertura de um amplo e polêmico processo de discussão a respeito da adoção ou não dessa tecnologia no país.

A questão teve desdobramentos tanto no âmbito do Poder Judiciário como do Executivo e no Legislativo brasileiros, em uma discussão que envolveu toda a sociedade. O resultado de toda essa polêmica foi o estabelecimento de um quadro regulatório extremamente burocrático e complexo a respeito dessa questão, marcando o início da moratória judicial para as liberações comerciais de OGM no Brasil e fazendo que as variedades GM permanecessem fora do mercado entre 1998 e 2003 (Brasil, 2010).

---

## A MORATÓRIA JUDICIAL PARA OGM E AS PESQUISAS DA EMBRAPA

---

Foram aprovados experimentos em campo com OGM da Embrapa (após uma moratória de quase de dois anos): em dezembro de 2003 (mamoeiro) e na sequência o feijão, a batata e a soja. A aprovação em dezembro de 2003 foi realizada com presença maciça da mídia e dos principais atores dos Ministérios da Agricultura e do Ministério do Meio Ambiente. Ela só foi possível pela apresentação, pela Embrapa, dos dados exigidos pelas agências reguladoras. As informações buscadas, organizadas e apresentadas pela Embrapa só foram possíveis graças à existência da Rede BioSeg, que organizou as competências e articulou a elaboração dos novos documentos exigidos.

---

Para regulamentar a matéria do ponto de vista ambiental, foi editada a Resolução nº 305/2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), que preconizava critérios e procedimentos para licenciamento ambiental de OGM e, quando fosse o caso, elaboração de estudos e respectivos relatórios de impacto ambiental, além de instruções normativas específicas do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Renováveis (Ibama).

Outra legislação que apresentava interface com a legislação de biossegurança à época era a de agrotóxicos, em especial, a Lei nº 7.802/89 e o Decreto nº 4.074/2002. No caso específico dos OGM, foram editadas três normas que regulavam a concessão do Registro Especial Temporário de OGM (RET-OGM) para OGM que expressasse resistência a pragas: a Instrução Normativa Conjunta nº 02/2002 do Mapa/Anvisa/Ibama, a Instrução Normativa nº 24/2002 do Ibama e a Resolução nº 57/2002 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa).

Além dessas normas, foram editados o Decreto nº 4.680/2003, que regula a questão da rotulagem de produtos que contenham OGM ou derivados em sua composição, e as Leis nº 10.688/2003, nº 10.814/2003 e nº 11.092/2005, que tratavam da questão do plantio e comercialização de soja RR no país nas safras 2002/2003, 2003/2004 e 2004/2005, respectivamente.

Todo esse emaranhado de leis e dispositivos infralegais que foram sendo editados no país, de 1995 a 2004, especialmente em razão de toda a polêmica gerada com a liberação comercial da soja RR, acabou por gerar um quadro extremamente burocrático e complexo.

À época, da concepção de um projeto de pesquisa para gerar determinado produto geneticamente modificado (GM) no país até que ele conseguisse ser efetivamente comercializado, fazia-se necessário percorrer um longo caminho, com um número elevado de licenças e autorizações que deveriam ser solicitadas a diferentes órgãos do governo ao longo do processo.

Nesse cenário conturbado, a Embrapa aprovou, em 2002, o projeto em rede denominado “Rede de Biossegurança dos OGM da Embrapa: Rede BioSeg” para desenvolver e executar protocolos de análises de segurança alimentar e ambiental de plantas GM, bem como desenvolver estudos para preenchimento de lacunas de conhecimento científico necessários à desregulamentação desses cultivos. Essa rede reuniu profissionais da Embrapa, universidades e outras instituições públicas e privadas, além de estudantes vinculados a essas instituições.

Além da parte propriamente legal, até 2004, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) e o Ministério da Saúde (MS) exigiam certificado de qualidade dos laboratórios (Boas Práticas de Laboratório – BPL) em relação aos dados apresentados para liberação de OGM – exigência onerosa que trazia muitas dificuldades de implantação por parte de empresas de pesquisa estatais. Assim, posteriormente à aprovação da Rede BioSeg, a Embrapa executou também um projeto específico para dotar a Empresa de laboratórios com BPL implementadas.

---

### **BIOSSEGURANÇA DE OGM DEMONSTRADA POR RESULTADOS DE ESTUDOS ACREDITADOS EM BPL**

---

A Rede BioSeg demandou a estruturação da Rede de Boas Práticas (Rede BPL) com o objetivo de estabelecer uma rede de laboratórios de Unidades da Embrapa de competência reconhecida para realização de estudos de segurança ambiental e alimentar de OGM, por meio do credenciamento formal em BPL dos projetos de pesquisa relacionados à biossegurança. Assim, iniciaram-se a construção da massa crítica e a mudança de cultura organizacional necessárias ao processo de implementação de sistemas de gestão da qualidade de resultados de pesquisa na Embrapa, origem do atual Sistema Embrapa de Qualidade (SEQ).

*Esdras Sundfeld, Líder da Rede BPL, Embrapa Agroindústria de Alimentos*

---

Na tentativa de solucionar esse verdadeiro caos regulatório que passou a imperar no país, foi editada, em março de 2005, a atual Lei de Biossegurança brasileira (Lei nº 11.105/2005), gerando um novo marco legal sobre esse assunto no país. Essa Lei, seguindo os princípios básicos da matéria, estabelece as regras para que a avaliação da segurança alimentar e ambiental de um produto GM sejam feitas desde o momento em que ele começa a ser trabalhado dentro de um laboratório até sua efetiva colocação no mercado consumidor e posterior manejo seguro da tecnologia<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> Ver mais detalhes em <http://www.ctnbio.gov.br>

A Lei nº 11.105/2005 instituiu uma nova estrutura para gestão dos riscos e potenciais benéficos das atividades envolvendo OGM e seus derivados no Brasil. Essa estrutura está baseada em quatro níveis: i) Conselho Nacional de Biossegurança (CNBS), órgão colegiado formado por ministros de Estado para assessoramento do presidente da república; ii) CTNBio, órgão colegiado e técnico responsável por decidir todas as questões técnicas relacionadas à segurança das atividades envolvendo OGM e seus derivados para pesquisa ou comercialização; iii) órgãos e entidades de registro e fiscalização do MS, do Mapa e do MMA referentes às atividades com OGM e seus derivados, como o Ibama e a Anvisa; e iv) Comissões Internas de Biossegurança (CIBios), obrigatórias em todas instituições que desenvolvam qualquer tipo de atividade envolvendo OGM e seus derivados, responsáveis por cuidar dos aspectos de biossegurança localmente (Amâncio, 2011).

É importante destacar que não é lógico afirmar que a Lei nº 11.105/2005 possa suspender a eficácia da Lei nº 6.938/81 (Política Nacional de Meio Ambiente) e seus dobramentos. Nenhum de seus dispositivos estabelece isso, bem como não foi essa a intenção do legislador. O que a lei faz é disciplinar a competência para a análise técnica da questão da segurança ambiental relacionada aos OGM e seus derivados no Brasil (pela singularidade e complexidade do tema), atribuindo essa competência expressamente à CTNBio. Uma vez decidido por este órgão colegiado, técnico e especializado que eventual atividade envolvendo OGM ou seus derivados é potencial ou efetivamente causadora de degradação ambiental, bem como sobre a necessidade do licenciamento ambiental dessa atividade, deverão ser observadas rigorosamente todas as disposições da Lei nº 6.938/1981, resguardadas todas as competências constitucionais relacionadas.

Certo é que a Lei nº 11.105/2005 foi resultado de um amplo processo de discussão envolvendo diferentes atores da sociedade sobre um tema naturalmente complexo, cujo debate sempre apresentou aspectos ideológicos inerentes. Sua edição representou um avanço da legislação brasileira, haja vista que as regras anteriores não eram claras o suficiente para determinar as competências de cada órgão para decidir sobre a segurança ambiental ou alimentar das atividades envolvendo OGM e seus derivados no país. A Lei nº 11.105/2005 pacificou definitivamente a maioria dessas discussões, sendo que os quase 16 anos de sua implementação garantiram à sociedade o acesso a tecnologias de ponta, não havendo, até o momento, comprovação de que qualquer tipo de dano ambiental ou à saúde humana tenha de fato ocorrido, apesar da ampla e difundida adoção das plantas GM no país.

## EMBRAPA E A PESQUISA COM OGM

A Embrapa teve um papel fundamental no processo de desenvolvimento e de regulamentação do cultivo de plantas GM no Brasil. Conforme mencionado anterior-

mente, em 2002, cinco cultivos GM da Embrapa se destacavam no portfólio de ativos tecnológicos em desenvolvimento na empresa, pelo potencial de controle de pragas-alvo<sup>9</sup> que almejavam ou pelo desafio dos estudos ambientais que teriam de superar. Todos, por sua vez, apresentavam lacunas de informação (regulatória ou científica) e necessidade do desenvolvimento de protocolos cientificamente delineados para subsidiar tomadores de decisão e público em geral com estudos padronizados confiáveis desenvolvidos por instituição pública (Arantes et al., 2011). Assim, esses produtos foram utilizados como modelos para os estudos de biossegurança, compreendendo: a soja-RR, o algodão tolerante a alguns insetos praga (algodão Bt), o mamão resistente ao vírus da mancha anelar (*Papaya ringspot virus* – PRSV-P), a batata resistente ao vírus Y (*Potato virus Y* – PVY) e o feijão resistente ao vírus do mosaico dourado (*Bean golden mosaic virus* – BGMV).

Dois vertentes temáticas se apresentavam – a ambiental e a alimentar – e deveriam ser observadas em conjunto, pois demandas diferenciadas por diferentes órgãos reguladores (antes de 2005) não justificavam trabalhos isolados para um mesmo produto GM. Assim, a Embrapa Meio Ambiente e a Embrapa Agroindústria de Alimentos coordenaram cada vertente que se apresentava igualmente em alguns produtos da rede (batata, feijão e mamão) ou separadamente em outros (algodão e soja). A área regulatória estabelecida na sede da empresa era o terceiro pilar coordenador.

A Rede BioSeg desenvolveu os estudos necessários para atender aos requisitos regulatórios estabelecidos pelos órgãos competentes (vários até 2004) e pela CTNBio (antes e após a aprovação da Lei nº 11.105/2005), bem como identificou as necessidades de capacitação e melhor infraestrutura. Como a geração de dados demanda equipe multidisciplinar de amplo espectro de atuação e estratégia de execução, a Rede BioSeg utilizou as competências das unidades da Embrapa, mas também das instituições parceiras. Ao final do projeto, o conjunto de informações necessárias para a solicitação de liberação comercial das plantas GM, já com eventos elite ou com estágio avançado de experimentação em campo, estaria pronto para submissão à CTNBio. Para os produtos que ainda não tinham eventos produzidos (caso do algodão), teriam sido estabelecidos protocolos-padrão para avaliação da biossegurança, capacitando a Embrapa para a avaliação de materiais desenvolvidos no futuro.

Quase duas centenas de pesquisadores estiveram envolvidos ao longo de cinco anos na Rede coordenada pela Embrapa Meio Ambiente e amparada pelo comitê gestor. Recursos financeiros foram obtidos não apenas da Embrapa, mas, especialmente, da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) e, ainda, de alguns órgãos fomentadores

---

<sup>9</sup> Praga é qualquer forma de vida vegetal ou animal ou qualquer agente patogênico daninho ou potencialmente daninho para os vegetais ou produtos vegetais (<http://www.fao.org/unfao/bodies/conf/c97/w5913e.htm>)

de bolsas, como o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia - Fapesb. Igualmente importante para a consolidação da ciência em análise de risco ambiental e segurança alimentar dos OGM, a Rede BioSeg contou com cooperação internacional, destacando-se, nesse aspecto:

- O Simpósio Brasileiro sobre Segurança Alimentar de Alimentos Derivados de Plantas Geneticamente Modificadas, realizado de 8 a 11 de setembro de 2002 no Rio de Janeiro, com participação de membros de agências reguladoras internacionais, como Food and Drug Administration (FDA), Health Canada, European Food Safety Authority, (EFSA), Food Standards Australia New Zealand (FSANZ), FAO, OMS, Organização Mundial do Comércio e Universidades de Wageningen e de Kansas. O evento possibilitou, na sequência, o primeiro treinamento em detecção de OGM (realizado na Universidade Federal do Rio de Janeiro e na Embrapa Agroindústria de Alimentos), favorecendo intercâmbio de informações para implementação dos laboratórios necessários para os trabalhos no Brasil.
- Estreita cooperação com o projeto *GMO Environmental Risk Assessment Methodologies* (GMO ERA)<sup>10</sup>, financiado pela *Swiss Agency for Development and Cooperation* (SDC) e coordenado por Angelika Hilbeck (Swiss Federal Institute of Science and Technology) e David Andow (University of Minnesota), que incorporou à Rede BioSeg discussões de protocolos e linha-base para estudos de impacto ambiental de OGM e inseriu os avanços do Brasil em fóruns internacionais;
- O Painel de Especialistas sobre Algodão Transgênico resistente a Insetos, organizado pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e pelo CNPq, sendo coordenado pela Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia (Fontes et al., 2002), com especial atenção à identificação de possíveis impactos sobre a biodiversidade agrícola.

Essas e outras atuações em muito agregaram conhecimento e fortaleceram a Rede BioSeg e a própria Embrapa em âmbito nacional e internacional.

---

### **CERTIFICADO DE QUALIDADE EM BIOSSEGURANÇA (CQB)**

---

Todos os experimentos da Rede BioSeg foram realizados com aprovação da CTNBio; todos os laboratórios da rede receberam CQB; todos os centros da rede estabeleceram uma Comissão Interna de Biossegurança (CIBio).

---

<sup>10</sup> <https://gmoera.umn.edu>

Vale ressaltar que, à época da aprovação da Rede BioSeg, a Embrapa contava com 13 Unidades de Pesquisa que já contavam com o CQB outorgado pela CTNBio, conforme exigência da Lei de Biossegurança. Essa abrangência geográfica foi um fator importante na avaliação a campo dos produtos, pois permitiu um melhor controle do material testado, propiciando, ao mesmo tempo, sua avaliação agrônômica em diferentes condições.

---

## A QUALIDADE NOS ESTUDOS SOBRE OGM

---

O projeto BioSeg teve como uma de suas principais ações estruturais inovadoras a montagem das diversas CIBios nas diferentes Unidades da Embrapa que participaram do projeto. Isso favoreceu a estruturação física (laboratórios, casas de vegetação, campos experimentais), a organização da documentação por meio de procedimentos operacionais e registros de controle (atualização, calibração, manutenção corretiva de equipamentos), além de reformas na parte civil das instalações utilizadas. A Rede BioSeg conseguiu proporcionar, simultaneamente nas diferentes Unidades, melhorias significativas antes e durante sua execução. Assim, as CIBios puderam obter ou manter os CQB para poderem manipular e trabalhar com OGM das diversas culturas-alvo do projeto. Sem dúvida, uma grande equipe e um grande projeto.

*Jose Luiz Viana de Carvalho – Embrapa Agroindústria de Alimentos*

---

---

## COLABORADORES DE EXCELÊNCIA

---

O trabalho do Projeto em Rede Bioseg somente foi possível pelo extenso conjunto de pesquisadores que atuaram nos estudos e discussões. A lista é extensa e multivariada em termos de áreas de conhecimento e instituições parceiras. As lideranças temáticas estão representadas nesse capítulo pelos autores, mas merecem menção destacada os pesquisadores que muito proximamente auxiliaram na coordenação das pesquisas, na recuperação de informações e na redação de vários subitens: Iêda Carvalho Mendes e Fábio Bueno dos Reis Junior (Embrapa Cerrados), Marcelo Ferreira Fernandes (Embrapa Tabuleiros Costeiros), Carlos Alberto Arrabal Arias (Embrapa Soja), na seção sobre “Soja tolerante ao herbicida glifosato”; Alcido Elenor Wander (Embrapa Arroz e Feijão) e Francisco Aragão, na seção “Feijão resistente ao Bean golden mosaic virus (BGMV)”. Também foi de grande apoio a analista Ana Lúcia Delalibera de Faria (MSc - Embrapa Arroz e Feijão), na etapa de coleta e revisão das referências e citações.

---

## ANÁLISES DE BIOSSEGURANÇA DOS PRODUTOS GM DA EMBRAPA

Os produtos GM da Embrapa, utilizados nos estudos da segurança, desenvolvidos pela Rede BioSeg, fizeram uso da engenharia genética para solucionar alguns dos problemas fitossanitários dessas culturas, dentre eles, a impossibilidade do controle de algumas pragas por métodos convencionais. São eles: i) qual problema agrícola abordado com potencial de solução via uso de OGM; ii) uma breve explicação de como foi desenvolvido o produto; iii) alguns aspectos dos estudos de impacto ambiental e/ou alimentar relacionados ao produto; e iv) destaque de resultados de estudos publicados.

Vale ressaltar que, para analisar a segurança alimentar dos OGM da Rede BioSeg, foram utilizadas, principalmente, as orientações da OECD que têm como base a equivalência substancial (Zaterka, 2019). O texto sobre segurança e equivalência substancial apresentado pela OECD (Organisation for Economic Co-Operation and Development, 1993) indica que a abordagem mais prática para a determinação da segurança é considerar se os alimentos GM são ou não substancialmente equivalentes a produtos alimentares análogos (se existirem). Deve-se considerar o processamento a que os alimentos podem ser submetidos e a utilização a que se destinam, assim como sua exposição. A exposição abrange parâmetros tais como a quantidade de alimento ou componentes alimentares na dieta, o padrão de consumo alimentar e as características da população consumidora.

A avaliação da segurança ambiental para OGM, como já apresentamos, estava sendo construída. Assim, resumidamente, são estas as principais situações de risco ambiental abordadas em cada cultura e estudadas quando pertinente para cada cultura da Rede BioSeg: i) potencial de transferência de material genético (fluxo gênico); ii) instabilidade (fenotípica e genética); iii) patogenicidade, toxicidade e alergenicidade a organismos não alvo da tecnologia; iv) potencial de sobrevivência, estabelecimento e disseminação, que, em conjunto, constituem o potencial de invasibilidade; v) outros efeitos negativos sobre organismos não alvo da modificação genética.

### Mamão resistente ao *Papaya ringspot virus* (PRSV-P)

O mamoeiro (*Carica papaya* L.) é uma cultura muito importante no Brasil (IBGE, 2019) e pode ser afetada por diferentes pragas, mas as viroses são problemas limitantes (Sanches; Dantas, 1999; Lima et al., 2017). Na época em que foi desenvolvido o mamoeiro transgênico na Embrapa, a principal virose da cultura era a mancha anelar, causada pelo *Papaya ringspot virus* (PRSV-P) (Souza Júnior et al., 2005).

O controle do PRSV-P é difícil porque ele é transmitido muito rapidamente por várias espécies de afídeos, dada sua relação do tipo não persistente com os vetores (King et al., 2012; Azad et al., 2014). As principais medidas adotadas para seu controle são o isolamento dos campos de produção e a erradicação precoce das plantas infectadas (Lima et al., 2017). Não há fontes de resistência para o PRSV-P em *C. papaya*, mas ela ocorre em algumas espécies da família do mamoeiro que têm sido utilizadas em programas de melhoramento genético (Jayavalli et al., 2011; Alviar et al., 2012; Dinesh et al., 2013). O longo período necessário para gerar uma nova cultivar com boas características agronômicas limita essa estratégia de busca da resistência em outras espécies (Dinesh et al., 2013).

A produção de plantas de mamoeiro GM para resistência ao PRSV-P é uma excelente e durável alternativa para seu controle (Li et al., 2014; Hamim et al., 2018; Wu et al., 2018; Baranski et al., 2019). A cultivar GM Sunrise Solo foi produzida nos Estados Unidos em parceria da Embrapa com a Universidade de Cornell. As plantas foram transformadas por biobalística como um cassete contendo o gene da capa proteica de um isolado do PRSV-P coletado na Bahia em diferentes versões traduzíveis e não traduzíveis, sendo selecionadas as populações de plantas que apresentaram melhor resposta (Souza Júnior, 1999). A seguir, sementes dessas plantas foram importadas e multiplicadas na Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia em Brasília (DF) e, depois, transferidas para a Embrapa Mandioca e Fruticultura, em Cruz das Almas (BA) (Souza Júnior et al., 2005). Nessa Unidade, as sementes de populações de mamoeiro GM foram semeadas em casa de vegetação e desafiadas com um isolado de PRSV-P predominante na região. As plantas sem sintomas foram transplantadas e avaliadas no campo, sendo selecionados dois eventos com boas características agronômicas e com o gene da CP em homozigose (Meissner Filho et al., 2021).

Antes do plantio, iniciaram-se análises de biossegurança do mamoeiro GM. Na primeira delas, Rodrigues et al. (2005) avaliaram o risco do plantio a campo do mamoeiro GM resistente a PRSV, o que viabilizou a liberação de seu plantio experimental na Unidade de Cruz das Almas, antes, ainda, da vigência da Lei de Biossegurança de 2005. Paralelamente, depois do plantio a campo, procedeu-se a uma série de análises para avaliar sua segurança ambiental, como efeito sobre micorrizas e insetos presentes no cultivo. Drechsel (2006) e Xavier et al. (2008) analisaram ferramentas para avaliar o efeito de mamoeiro GM na microflora de mamoeiro. Na avaliação de seis eventos de transformação de mamoeiro, um apresentou os perfis de 16S rDNA PCR-DGGE mais próximo aos da planta convencional. Esse critério deve ser levado em conta no momento da escolha de evento elite (Drechsel, 2006). Já Fonseca et al. (2010a, 2010b) estruturaram um banco de dados de mamoeiro convencional cultivado em várias regiões do Brasil para uso futuro em estudos de equivalência substancial com o mamão GM. Lima (2006) e Munhoz et al. (2008) avaliaram a viabilidade e possíveis alterações em pólen obtido de mamoeiros GM, não encontrando diferenças em relação ao pólen

dos mamoeiros não GM. Leal-Costa (2006) e Leal-Costa et al. (2010) realizaram uma série de análises botânicas de folhas de mamoeiro convencional e GM e não verificaram nenhuma alteração significativa entre elas. Estavam previstos ensaios de campos no Ceará, mas estes não foram conduzidos, em função do encerramento do projeto.

Novas variedades de mamoeiro GM em desenvolvimento no Brasil precisam ter resistência ao PRSV-P e ao Papaya meleira virus (PMeV), atualmente, os mais importantes vírus da cultura no país. A resistência genética de plantas para viroses é a forma mais econômica e eficiente para seu controle, sendo uma tecnologia disponível para qualquer produtor.

### Feijão resistente ao *Bean golden mosaic virus* (BGMV)

O feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.), a exemplo de outras importantes plantas alimentícias, teve origem no Novo Mundo, tendo sido levado ao Velho Mundo após o descobrimento da América.

Com relação ao Brasil, Gepts et al. (1988) sugerem que no mínimo duas – mas possivelmente três – rotas distintas devem ser responsáveis pela introdução do feijão: uma para os feijões pequenos, mesoamericanos, seria originária do México, seguindo para o Caribe, Colômbia, Venezuela e daí para o Brasil; uma segunda rota seria para os feijões grandes, com faseolina “T”, como a cultivar Jalo, que deveria ser proveniente dos Andes (Peru); uma terceira rota seria proveniente da Europa, com os feijões sendo trazidos por imigrantes que de lá vieram (introduções mais recentes). Esta última rota é a mais provável para alguns casos, como o do feijão Carnaval, preferido por imigrantes italianos.

O Brasil é o maior produtor mundial de feijão-comum, tendo a cultura papel socioeconômico destacado. A produção brasileira atende essencialmente ao mercado interno, onde o consumo de feijão-comum é elevado, mas há exportação de alguns tipos, denominados feijões especiais. Trata-se de uma excelente fonte de proteínas, além de diversos outros nutrientes essenciais à dieta humana. O plantio de feijão no Brasil ocupou cerca de 2.927 milhões de hectares, tendo apresentado uma produção estimada em 3.222 milhões de toneladas na safra 2020/2021, com uma produtividade média nacional de 1.060 kg de feijão por hectare. A região brasileira responsável pela maior parte da produção de feijão, em 2019, foi o Sudeste, com 28% da produção. A Região Centro-Oeste, em 2019, totalizou 22,3% da produção nacional, em 12,4% da área de produção de feijão<sup>11</sup>. De acordo com o Censo

---

<sup>11</sup> Conab (<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/3691-producao-de-graos-da-safra-2020-21-segue-como-maior-da-historia-268-9-milhoes-de-toneladas>)

Agropecuário do IBGE (2017), a produção nacional do feijão-comum, em grãos de cores e preto, na agricultura familiar representou, em 2017, 16,3% (242.534 t) da produção nacional de 1.484.202 toneladas e 27,3% (231.648 ha) da área total colhida de 848.116 hectares. Essa produção foi conduzida por 237.991 agricultores familiares de feijão-comum, representando 82,6% do total de estabelecimentos que cultivaram o feijão-comum (IBGE, 2017).

Entre os problemas sanitários da cultura, encontram-se as viroses, muitas das quais de difícil controle. Dessas, o mosaico dourado constitui desafio à pesquisa desde sua constatação nos anos 1960–1970. Não foi encontrada resistência genética à doença no germoplasma disponível no Brasil e no Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Trata-se do vírus tecnicamente denominado Bean golden mosaic virus (BGMV), transmitido pelo inseto *Bemisia tabaci* (mosca branca).

A doença existe no país desde 1961, e aumentou de importância com a expansão da cultura da soja, que é uma excelente hospedeira do inseto (Costa, 1965, 1975) e do vírus. O mosaico dourado é especialmente importante para o feijoeiro cultivado no plantio “da seca”, onde pode causar redução de produção variando de 40 a 100%, dependendo da incidência na lavoura, época de ocorrência e da cultivar (Costa; Cupertino, 1976; Rocha; Sartorato, 1980). A doença ocorre nas principais áreas produtoras de feijão do Brasil, desde a região central do Paraná até o norte do país (Faria et al., 2016).

Após o sequenciamento do vírus em 1990 (Gilbertson et al., 1993), os estudos com outros vírus da família *Geminiviridae*, à qual o BGMV pertence, e, ainda, os desenvolvimentos da tecnologia do DNA recombinante, foi aprovado o primeiro projeto de transformação genética de feijoeiro para resistência ao BGMV em 1991. O conceito de “resistência derivada do patógeno”, em que parte do genoma do agente causal da doença, integrado ao genoma da planta, resultava em resistência à mesma doença, havia sido estabelecido para um vírus de RNA, o TMV, utilizando o tabaco como planta experimental em 1985. Plantas transgênicas<sup>12</sup> expressando segmentos do genoma viral podem mostrar resistência ao vírus que forneceu o fragmento ou a outros filogeneticamente próximos (Fitch; Beachy, 1993).

A Embrapa aprovou a ideia e o projeto foi financiado pelo CNPq. As questões relativas à biossegurança e a aceitação de um possível produto GM foram deixadas para uma época posterior, pois não havia uma lei de biossegurança, até então no

---

<sup>12</sup> Um organismo geneticamente modificado ou OGM, segundo a Lei nº 11.105 de 2005, é o organismo cujo material genético (ADN/ARN) tenha sido modificado por qualquer técnica de engenharia genética. Quando é designado “transgênico”, significa que em seu genoma ou material genético foi inserido um gene ou um fragmento de DNA exógeno. Isto se tornou possível graças ao desenvolvimento da denominada tecnologia do DNA recombinante.

Brasil. Esse primeiro projeto utilizou a estratégia de antissenso das regiões codantes para as proteínas envolvidas em aspectos de replicação e movimento viral, essenciais ao vírus. Foram obtidas plantas transgênicas, mas elas não apresentaram resistência completa ao BGMV. A expressão do gene rep, essencial à replicação viral, com uma mutação letal, resultou em plantas resistentes, porém, apenas com inoculações realizadas com baixo número de insetos (Faria et al., 2006). Um fragmento de 400 bases desse mesmo gene, utilizando o sistema denominado “RNA interferente”, resultou em plantas completamente resistentes.

Após as etapas de construção da planta, seleção das plantas com tolerância ao vírus, os eventos em fase de casa de vegetação enfrentaram a moratória legal em 2002, tendo, a partir de então, passado a integrar a Rede BioSeg. Com a conclusão dos estudos da Rede BioSeg em 2008 e com resultados já em etapa avançada de campo, os experimentos com o feijão GM seguiram com recursos da Embrapa e foram conduzidos a campo em três localidades representando biomas diversos: Santo Antônio de Goiás (GO), Sete Lagoas (MG) e Londrina (PR). Foram mobilizados colaboradores (Embrapa, Universidade de Brasília, Universidade Federal do Ceará, Universidade Estadual Paulista – campus Botucatu, Instituto de Tecnologia dos Alimentos – Ital) para analisar possíveis efeitos do transgene, de acordo com resoluções da CTNBio, com o objetivo de apresentar o pedido de liberação comercial. O conjunto de informações obtidas (em todas as etapas do desenvolvimento desse feijão GM) pode ser encontrado no endereço da CTNBio<sup>13</sup>.

---

## DETECÇÃO EVENTO-ESPECÍFICA DO FEIJÃO RMD, EMBRAPA 5.1

---

A detecção evento-específica do feijão Embrapa 5.1 ou de futuras cultivares com o transgene é uma exigência durante a apresentação do pedido de liberação comercial. Foi tema de estudos na Bioseg e permitiu capacitação de equipe. No documento disponível na CTNBio mencionado anteriormente, foram apresentados nove pares de oligonucleotídeos específicos, todos com excelente desempenho na PCR, mesmo se as plantas vierem a ser infectadas pelo BGMV ou outro begomovirus. Amostras de DNA de feijão convencional não amplificam com os referidos oligonucleotídeos.

*Edna Maria Moraes Oliveira – Embrapa Agroindústria de alimentos*

---

<sup>13</sup> [http://ctnbio.mctic.gov.br/liberacao-comercial/-/document\\_library\\_display/SqhWdohU4BvU/view/678011;jsessionid=85F94E2ECDC409E6A0DB83E848213BA6.columba](http://ctnbio.mctic.gov.br/liberacao-comercial/-/document_library_display/SqhWdohU4BvU/view/678011;jsessionid=85F94E2ECDC409E6A0DB83E848213BA6.columba)

O feijoeiro transgênico, cuja primeira cultivar comercial BRS FC401RMD já iniciou o cultivo comercial, foi aprovado pela CTNBio em 2010<sup>14</sup>.

Em 2019, o presidente da Embrapa, Sebastião Barbosa, e a Ministra da Agricultura, Tereza Cristina Correa da Costa Dias, sinalizaram positivamente a comercialização do feijão transgênico, tendo início a fase para encontrar parceiros para multiplicar as sementes e finalmente chegar ao produtor de grãos.

Além de seguro, o feijão transgênico da Embrapa é um exemplo de impacto social e alimentar do uso da engenharia genética. As variedades transgênicas de feijão garantem vantagens econômicas e ambientais, com diminuição das perdas, garantia das colheitas e redução na aplicação de defensivos agrícolas.

### Algodão resistente a insetos (algodão Bt)

O Brasil é um dos maiores produtores, consumidores e exportadores de fibras de algodão (*Gossypium hirsutum*) do mundo. O algodoeiro é cultivado em diferentes regiões do país, que apresentam características diversas de clima e de solo. O nível de tecnologia e de insumos agrícolas, como inseticidas, herbicidas ou fertilizantes orgânicos usados, é também variável, desde um nível baixo, em pequenas propriedades no Nordeste, até um nível muito alto, nas grandes fazendas da Região Centro-Oeste (Fontes et al., 2006).

O melhoramento genético do algodão vem sendo feito formalmente no Brasil desde o começo dos anos de 1930, e atualmente, é conduzido por instituições públicas e privadas. As características avaliadas pelos melhoristas buscam atender a demandas da agricultura e da indústria. As características agrícolas incluem resistência a patógenos e artrópodes pragas, tolerância à seca, altura da planta, maturação precoce, tamanho do capulho, retenção da fibra no capulho e produtividade. As principais características industriais são resistência, espessura, percentagem e comprimento da fibra (Andow et al., 2006).

Variedades de algodoeiro GM para resistência a insetos e tolerância a herbicidas, desenvolvidas por empresas multinacionais, vêm sendo plantadas no Brasil desde 1998. As primeiras variedades transgênicas comercializadas no Brasil tinham base em linhagens geradas em outros países e adaptadas às condições ambientais e agrícolas locais, utilizando o método de *backcrossing* para introduzir o transgene nas principais variedades elites brasileiras.

---

<sup>14</sup> Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CTNBio). 2010. Processo 01200.005161-2010-86 – Liberação comercial de feijão geneticamente modificado resistente ao vírus do mosaico dourado.

Cerca de 70% do algodão brasileiro é plantado na Região Centro-Oeste. Variedades desta região podem render mais de 4000 kg/ha, com percentagem de pluma superior a 38%, e precisam ser adaptadas à colheita mecânica<sup>15</sup>.

Os insetos-praga constituem um dos principais problemas agrônômicos da cultura do algodoeiro, causando grandes prejuízos econômicos anualmente. O dano causado por pragas (o conceito de pragas inclui insetos e doenças<sup>16</sup>) é a principal restrição à produtividade. Pelo menos 30 espécies de insetos, três espécies de ácaros e várias doenças causadas por vírus, bactérias e fungos causam danos significativos à cultura. Algumas doenças são transmitidas por insetos (Sujii et al., 2006; Chitarra, 2007; Miranda et al., 2015). A espécie que causa maior dano econômico à cultura é o bicudo do algodoeiro.

Três espécies do gênero *Gossypium* ocorrem nas regiões de cultivo de algodão no Brasil: *Gossypium hirsutum* L., *Gossypium barbadense* L. e *Gossypium mustelinum* Miers, todas sexualmente compatíveis entre si. Na Região Nordeste, três variedades de *G. hirsutum* podem ocorrer espontaneamente ou ser cultivadas (Fontes et al., 2006; Menezes et al., 2017). A mais tradicional é o algodão mocó (*G. hirsutum* var. *marie-galante*), que era plantada em mais de 2 milhões de hectares durante os anos 1970. Posteriormente, o plantio das variedades mocó ficou restrito às regiões mais secas dos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba e Ceará (Menezes et al., 2017). A segunda classe de variedades é formada por híbridos entre o algodão mocó e *G. hirsutum*, e inclui fibras de algodão branco e colorido. A terceira classe conta com variedades de alto desempenho de *G. hirsutum*, que são plantadas em áreas com mais de 600 mm de chuvas ou áreas irrigadas (Andow et al., 2006).

A presença de espécies e variedades nativas do algodoeiro cultivado no Brasil foi a principal razão da inclusão dessa cultura na Rede BioSeg. Para a liberação destas variedades para o plantio comercial, em razão das características regionais específicas e da presença de espécies silvestres aparentadas ao algodão cultivado no Brasil, os riscos ambientais potenciais a organismos não alvo e a possibilidade de hibridização e escape dos genes de resistência a outros habitats precisavam ser amplamente avaliados. Havia, ainda, a preocupação com o efeito adverso dessas variedades sobre organismos não alvo. A fim de identificar os tópicos-alvo da pesquisa de avaliação de risco do algodão transgênico, realizou-se, anteriormente à implementação da Rede BioSeg, um Painel de Especialistas sobre Algodão Transgênico Resistente a Insetos, organizado pelo MCTI e pelo CNPq e coordenado pela Embrapa Recursos Genéticos

---

<sup>15</sup> <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>

<sup>16</sup> Pragmas são qualquer espécie, raça ou biótipo de planta, animal ou agente patogênico que danifica plantas ou produtos vegetais. Para saber mais, acesse: <https://www.embrapa.br/tema-pragas-quarentenarias/perguntas-e-respostas>

e Biotecnologia (Fontes et al., 2002). Os resultados indicaram três principais alvos que foram objeto de pesquisa na Rede BioSeg para avaliar os possíveis impactos sobre a biodiversidade agrícola associada à cultura do algodoeiro: efeito sobre artrópodes não alvo, efeito sobre a microbiota endofítica, epífita e do solo e efeito sobre espécies silvestres e raças locais de plantas aparentadas ao algodão cultivado.

---

### MODELOS E SIMULAÇÕES PARA AVALIAR EFEITOS ADVERSOS SOBRE ORGANISMOS NÃO ALVO

---

A rápida evolução de resistência de pragas-alvo a OGM desenvolvidos para controle de pragas (plantas resistentes a insetos) pode levar à perda de eficiência dessa tecnologia em poucos anos. A Rede BioSeg aperfeiçoou modelos que simulam esse processo de evolução, ferramentas indispensáveis para definição de estratégias de manejo de culturas transgênicas, buscando prolongar a vida útil da tecnologia. Também foram desenvolvidos métodos e programas computacionais para estudos demográficos em populações de artrópodes (insetos e ácaros) de amplo uso nos estudos de plantas inseticidas, nos aspectos relacionados à eficiência de controle de pragas e efeitos adversos em artrópodes não alvo.

*Aline de Holanda Nunes Maia - Embrapa Meio Ambiente*

---

Com os estudos desenvolvidos na Rede BioSeg, geraram-se informações fundamentais sobre a biologia, a ecologia e interações de organismos associados à cultura do algodoeiro (muitas delas disponíveis em Hilbeck et al., 2006), inclusive espécies silvestres aparentadas (BOX A), e esclareceram-se questões substanciais para análise de risco de plantas transgênicas resistentes a insetos, em particular as variedades de algodão Bt<sup>17</sup>. O efeito adverso potencial de toxinas Bt<sup>18</sup> foi avaliado em herbívoros não alvo, como pulgões (Sujii et al., 2008) e bicudo do algodoeiro (Pires et al., 2013), polinizadores (Lima et al., 2011; Pires et al., 2014), predadores (Nakasu et al., 2013; Paula et al., 2015; Andow et al., 2016) e borboletas (Paula et al., 2014). Nos estudos citados, não se encontrou efeito detrimental da proteína Cry1Ac sobre herbívoros e abelhas ou efeito adverso direto sobre larvas e pupas da joaninha predadora, *Cycloneda sanguinea* (Coleoptera: Coccinellidae).

---

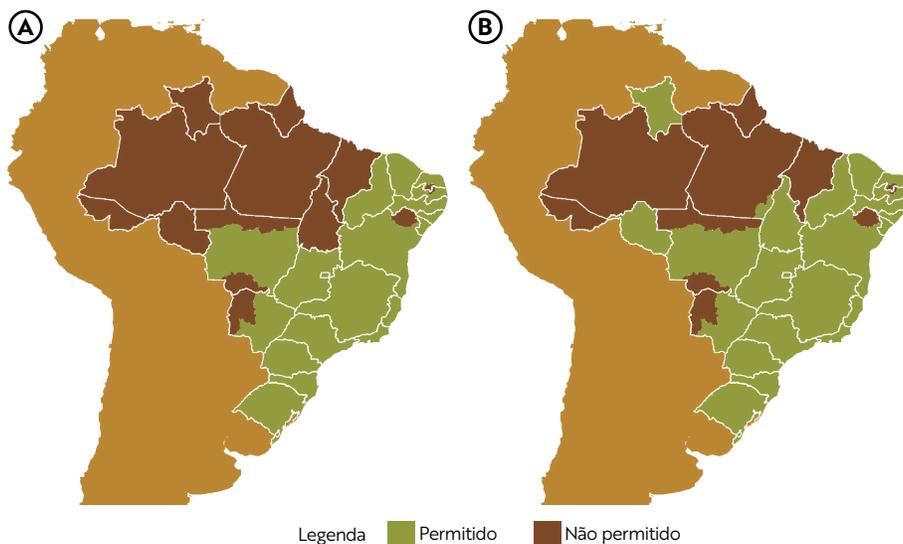
<sup>17</sup> O algodão Bt é o algodão que recebeu genes da bactéria de solo *Bacillus thuringiensis*, daí a denominação Bt. Essa bactéria produz proteínas tóxicas a determinados tipos de insetos, principalmente da ordem Lepidoptera. A partir da introdução de um gene dessa bactéria numa planta, esta passa a expressar a proteína, tendo, portanto, características inseticidas.

<sup>18</sup> Toxinas Bt são as proteínas tóxicas produzidas pela bactéria *B. thuringiensis*. É toda uma família de toxinas muito conhecidas e estudadas. Mais informações em Carneiro et al. (2009).

No entanto, Paula et al. (2014, 2015) e Paula e Andow (2016) relataram o sequestro e a transferência da proteína Cry1Ac dos pais para a prole na borboleta *Chlosyne lacinia* (Lepidoptera: Nymphalidae) e sequestro, transferência e acúmulo de Cry1Ac e Cry IF no predador afidófago, *Harmonia axyridis* (Lepidoptera: Coccinelidae).

## CRIAÇÃO DE ZONA DE EXCLUSÃO DE ALGODOEIRO GENETICAMENTE MODIFICADOS

Os trabalhos para verificar as possibilidades de interação dos algodoeiros GM com outras espécies de *Gossypium* envolveram a realização de dezenas de expedições para localização, caracterização in situ e genética de *Gossypium mustelinum*, *G. barbadense* e do algodoeiro mocó (*G. hirsutum* r. Marie Galante). Como resultado dos trabalhos, elaborou-se uma proposta de zona de exclusão de algodoeiros GM (Barroso et al., 2005), delimitando locais onde algodoeiros GM poderiam ser cultivados. Ela foi incorporada como mandatória nos marcos legais da CTNBio e do Mapa. Posteriormente, a zona de exclusão foi alterada com base em novos estudos realizados. Na Figura 21.1A é indicada a zona de exclusão válida antes de 2015 e na Figura 21.1B aparecem as atualizações feitas a partir de 2015.



**Figura 21.1.** Localização das áreas propostas como zonas de exclusão para o plantio de cultivares de algodoeiro geneticamente modificado: (A) zona de exclusão válida antes de 2015; (B) atualizações feitas a partir de 2015. Fonte: Adaptado de Barroso et al. (2023).

As informações levantadas, muitas delas disponíveis em Hilbeck et al. (2006), contribuíram para o entendimento dos seguintes tópicos da análise de biossegurança: 1) o potencial de transferência do transgene da planta GM para outras espécies ou raças aparentadas; 2) o efeito da tecnologia sobre o controle biológico natural e o potencial de origem de novas pragas; 3) o efeito sobre herbívoros não alvo e polinizadores; 5) o efeito sobre a biota endofítica, epífita e do solo; e 6) o destino da toxina Bt no solo.

Além disso, geraram-se metodologias e protocolos de pesquisa e treinou-se um número significativo de estudantes e profissionais para atuar em pesquisa, regulação e fiscalização sobre a liberação segura no meio ambiente de variedades transgênicas de algodão.

Pesquisas buscando variedades resistentes ao bicudo seguem em curso na Embrapa. Variedades GM de algodão resistentes a doenças que incorporam eventos transgênicos Bollgard II® e Roundup Ready Flex® por meio de introgressão, que conferem maior resistência às pragas de lepidópteros e tolerância ao herbicida glifosato, respectivamente, foram desenvolvidas pela Embrapa e já estão sendo comercializadas<sup>19</sup>. Porém, as variedades que estão no mercado há mais tempo, e são as mais utilizadas, são aquelas resistentes a herbicidas, à lagartas (insetos-praga da ordem Lepidoptera) ou as duas características combinadas<sup>20</sup>.

### Batata resistente ao *Potato virus Y* (PVY)

A batata é a hortaliça mais importante no Brasil, sendo plantada – em 2020 – em uma área de 121 mil hectares, com uma produção de mais de 3,6 milhões de toneladas<sup>21</sup>. As lavouras de batata estão presentes desde o Rio Grande do Sul até o Distrito Federal, sendo também encontradas em microclimas da Região Nordeste. Socialmente, a batata é uma importante fonte de emprego no campo, sendo grande a demanda por mão de obra durante todo o ciclo da lavoura. Além da importância na zona rural, a comercialização e o processamento da batata são também atividades de forte impacto econômico e social na zona urbana.

As pragas, incluindo o *Potato virus Y* (PVY), têm um importante papel (Cupertino; Costa, 1970; Câmara et al., 1986) como efeito limitante da produtividade. Além disso, o PVY compromete a produção de tubérculos-semente de qualidade no país, impedin-

---

<sup>19</sup> <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1112950/catalogo-de-cultivares-de-algodao-safra-2019-2020>

<sup>20</sup> A CTNBio considera um OGM combinado como aquele “que contém mais de um evento de transformação”, sendo que evento de transformação “{é aquele com uma, ou múltiplas inserções de uma mesma construção genética inserida no genoma do organismo receptor, como resultado de uma transformação genética”. Saiba mais em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-normativa-n-32-de-15-de-junho-de-2021-326241632>

<sup>21</sup> <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>

do que o agricultor produza seu próprio estoque com consequente elevação de preço desse insumo.

A suscetibilidade ao PVY impede que o agricultor produza o próprio estoque de tubérculos para semente. Se isso fosse possível, no caso de uma cultivar com resistência ao vírus, ainda que os preços dos tubérculos-semente fossem altos, os produtores poderiam, após adquiri-los, plantá-los e, na colheita, reservar um lote que seria utilizado como semente para a próxima lavoura. Fazendo isso por três ou quatro safras, os produtores poderiam diluir em até 75% o custo dos tubérculos-semente, que representam, em média, 35% do custo de produção, podendo chegar, dependendo do ano e da cultivar, a mais de 50%.

Cultivares de batata resistentes ao PVY, como a outras doenças, podem ser obtidas por meio do melhoramento convencional. Porém, diversos fatores intrínsecos à espécie (p. ex., ploidia) e aos processos meióticos envolvidos na reprodução sexuada tornam longo o processo convencional de obtenção de cultivares. Necessita-se, ainda, de uma boa estratégia de transferência de tecnologia, para que a nova cultivar possa ser avaliada em condições reais de produção, tornando-se conhecida e ganhando a confiança dos agricultores.

A tecnologia do DNA recombinante (transformação genética) abriu a oportunidade de execução mais rápida do melhoramento, uma vez que o material genético ou cultivar que foi produzido já apresenta as características comerciais esperadas por produtores e consumidores, restando apenas introduzir a característica-alvo. Por outro lado, o material produzido por transformação genética pode apresentar algumas características distintas do parental não transformado, em decorrência de alguma mudança provocada pela introdução no genoma de um gene exótico. Portanto, as hipóteses levantadas sobre riscos ambientais e eventuais danos causados pelo consumo por humanos ou animais devem ser testadas para comprovação da segurança no uso dos OGM em larga escala.

A Embrapa iniciou esse trabalho em 1994, em projetos para obtenção de plantas de batata com resistência ao PVY. Como resultado, obteve-se um clone da cultivar Achat transformada com o gene CP-PVY (capa proteica do *Potato virus Y*), o qual apresentou, nos bioensaios de casa de vegetação e campo, alta resistência ao PVY (Torres et al., 1999; Dusi et al., 2001; Romano et al., 2001). À época, essa cultivar era a principal cultivada no Brasil.

O clone transformado foi obtido pela inserção do gene da capa proteica do PVY conseguida junto ao Centro Internacional da Batata (CIP). A descrição detalhada encontra-se em Romano et al. (2001). Brotos axilares da cv. Achat obtidos de plantas *in vitro* livres de vírus foram transformadas via *Agrobacterium tumefaciens* LBA4404, contendo o vetor de transformação pBI-PVY com o gene da capa proteica do PVY e o gene marcador *NPT II*. As plantas transformadas foram desafiadas em condições con-

troladas de casa de vegetação com as estirpes PVY-OBR e PVY-NBR, e um dos clones selecionados foi utilizado para as avaliações subsequentes de biossegurança.

Como continuação do desenvolvimento do material, fez-se necessário que fossem avaliados aspectos relativos à biossegurança do OGM para atendimento das exigências legais, visando a sua posterior utilização comercial. Assim, as ações com batata passaram a integrar a Rede BioSeg para desenvolver protocolos para avaliação da segurança alimentar e ambiental desse OGM e sua avaliação per se, para atendimento das exigências legais para liberação comercial. Essa abordagem devia ser realizada em rede, uma vez que uma única Unidade de Pesquisa da Embrapa não teria a competência instalada para tal. Essa complementação de competências instaladas nas diferentes Unidades e parceiros qualificou a empresa para a condução desse projeto.

Não se esperavam impactos ambientais negativos motivados por fluxo gênico, uma vez que o OGM objeto desse projeto não floresce, não havendo risco de fluxo gênico. O gene inserido codifica para uma proteína que já é largamente consumida em materiais naturalmente infectados por vírus, não sendo esperados, também, problemas derivados de seu consumo por humanos ou animais.

As atividades foram desenvolvidas tanto em contenção (laboratório e casa de vegetação) como em campo. As atividades em contenção foram conduzidas na quase totalidade, tendo sido desenvolvidos os protocolos para caracterização molecular e fenotípica do OGM comparativamente à cultivar Achat (parental não transformado). Posteriormente, a caracterização fenotípica foi validada em ensaios de campo. Não houve detecção da expressão de proteína traduzida do gene inserido no OGM por ELISA ou *western-blotting*.

Em campo, demonstrou-se a estabilidade da resistência em gerações sequenciais. Nas liberações controladas realizadas, não se observou indicação de haver potencial invasor maior que a cv. Achat não transformada. O monitoramento da entomofauna associada não detectou diferença de população de alguns insetos-praga de batata entre OGM e cv. Achat.

Quanto à avaliação da resistência a outros patógenos, como *Potato leafroll virus* (PLRV, cuja resistência é natural no parental não transformado), murcha bacteriana, pinta preta, requeima e nematoide das galhas os ensaios em contenção e observações de campo indicaram não haver aumento ou redução de susceptibilidade do OGM em comparação à cv. Achat.

O impacto sobre a biota de solo foi apenas parcialmente executado, tanto em contenção como em campo, e os resultados preliminares não identificaram impacto do OGM quando comparado com o parental não transformado.

Foi possível, ao longo do projeto, testar o sistema de envio de amostras com base em instrução normativa da CTNBio. À época, havia resistência das empresas aéreas

em transportar esse tipo de material. Entretanto, após negociações diretas com as empresas, foi possível viabilizar o envio.

Houve demonstração parcial da ausência de impacto do OGM em organismos não alvo e uma ampla oportunidade de discussão do tema biossegurança na Embrapa, com eventual reflexo na política institucional de desenvolvimento de OGM.

O alcance de objetivos e das metas estabelecidas foi retardado em função dos problemas com as licenças ambientais (até 2004) por motivos externos à rede, apresentados nos tópicos iniciais deste capítulo, mas que tiveram movimento e envolvimento dos membros da equipe para tentar contorná-los e influir nas políticas públicas em vigor à época. Outra fonte de atraso foi a demora em obter a avaliação dos pedidos de liberação controlada no ambiente pela CTNBio, que só saíram no fim do segundo semestre de 2006.

Todo o trabalho que pôde ser conduzido em contenção foi realizado, e os que foram atrasados por motivos externos à rede puderam ter ajustadas as metodologias e permitiram que o preparo do banco de dados referente aos estudos de segurança alimentar fosse seguindo no que tangia aos produtos não transformados.

Os resultados obtidos (ensaios, metodologias, workshops) propiciaram a elaboração de um dossiê parcial que poderá, eventualmente, ser utilizado para a estruturação de um novo projeto, com vistas à desregulamentação de um novo evento de batata transgênica.

Em adição à participação em publicações da Rede BioSeg (artigos em congresso e outros), destacam-se as publicações específicas referentes aos estudos com batata GM (Ferreira et al., 2008, 2009; Dusi et al., 2009). Adicionalmente, destaca-se um espaço de oito minutos no programa *Globo Rural* veiculado em 19 de julho de 2004 (Dusi, 2004).

No segundo semestre de 2007, a direção da Embrapa cancelou ensaios da batata e de outros produtos-alvo da Rede BioSeg.

## Soja tolerante ao herbicida glifosato

O glifosato, comercializado como Roundup® pela Monsanto, é um herbicida não seletivo de amplo espectro que controla ervas daninhas de folha larga e gramíneas. O mecanismo de ação é baseado na inibição da atividade da 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase (EPSPS), que catalisa reações de síntese de aminoácidos aromáticos (fenilalanina, tirosina, triptofano) em plantas e microrganismos. A base da resistência ao glifosato em soja é a inserção do gene EPSPS de *Agrobacterium* estirpe CP4, que torna a planta insensível a esse herbicida (Padgett et al., 1995).

A soja *Roundup Ready*®, ou soja-RR, foi o OGM pioneiro no Brasil, para o qual a Monsanto estabeleceu parceria com a Embrapa para a incorporação do transgene em germoplasma da Embrapa. Para a liberação comercial da soja-RR, porém, a CTNBio

exigiu, em 1998, o monitoramento dos plantios por um período de cinco anos. Em junho de 2000, porém, foi concedida uma liminar impedindo o cultivo e a comercialização das cultivares RR até que o governo federal definisse as regras de segurança, rotulagem e comercialização, apresentando um estudo de impacto ambiental. Foi apenas em 2002 que estudos de impacto ambiental foram regulamentados por lei, e a CTNBio, definida como órgão responsável pela análise dos resultados.

Os microrganismos do solo desempenham papéis fundamentais na ciclagem de nutrientes, na degradação de xenobióticos, entre outros, e alguns estudos indicavam impacto negativo tanto de agrotóxicos como de transgenes na microbiota do solo (Reis Junior; Mendes, 2009). Além disso, anos de pesquisa em fixação biológica do nitrogênio (FBN) com a soja no Brasil tornaram o país líder em benefícios no aproveitamento do processo, com independência total de fertilizantes nitrogenados na cultura (Hungria; Mendes, 2015; Hungria; Nogueira, 2019), e havia a preocupação de que a transgenia poderia afetar a FBN (Mendes et al., 2009). Dada a importância da fixação biológica de nitrogênio nesse cultivo, os estudos sobre microrganismos precisaram ser ampliados, estudos estes que passaram a fazer parte da Rede BioSeg em 2003.

O desafio inicial foi definir quais metodologias e critérios seriam utilizados para a avaliação de impactos no ambiente e na FBN. Fazia-se igualmente necessária a implementação dos princípios de boas práticas de laboratório (BPL) nos ensaios e análises. Somam-se, ainda, as dificuldades de avaliação em um país como o Brasil, pela dimensão e condições edafoclimáticas diversas. Por outro lado, sendo a Embrapa detentora do germoplasma parental, havia a grande oportunidade de avaliação direta dos efeitos da transgenia.

Os estudos iniciais abrangeram dois grupos de ensaios com o objetivo principal de determinação de um conjunto mínimo de parâmetros que permitisse a obtenção de dados robustos para a avaliação do impacto ambiental e da FBN a campo. O primeiro grupo foi conduzido na safra 2002/2003, em áreas comerciais com soja convencional, no aguardo da liberação da soja-RR pela CTNBio. Com a liberação, o segundo grupo envolveu experimentos com a soja convencional Conquista e a Conquista, RR, na safra 2003/2004. Ao todo, nos dois grupos, foram coletados dados em 11 municípios de seis estados e no DF. Com relação às avaliações qualitativas e quantitativas da microbiota do solo, constatou-se que a variabilidade temporal dos parâmetros de carbono e nitrogênio da biomassa microbiana (CBM e NBM, respectivamente), da respiração basal (RB) e do quociente metabólico microbiano ( $qCO_2$ ) foi adequada, definindo-se que o coeficiente de variação (CV) máximo aceitável para esses parâmetros deve ser de 35%. Para avaliar a homogeneidade entre repetições, tratamentos e coletas, a adequabilidade da análise da eletroforese do DNA do solo em géis desnaturantes (DGGE) foi confirmada, com nível máximo de dissimilaridade de 10%.

Quanto aos parâmetros da FBN, definiu-se que, em solos pobres em nitrogênio (N), os parâmetros de massa de nódulos secos (MNS) e massa da parte aérea seca (MPAS), com CV máximo de 33% e 18%, respectivamente, fornecem as informações necessárias. Já em solos com teores elevados ou desconhecidos de N ou que receberam fertilizantes nitrogenados, há necessidade de complementação com as análises do nitrogênio total (NTPA) e nitrogênio como ureídeos (NU) da parte aérea, com CV máximo estabelecido em 18% e 21%, respectivamente (Souza et al., 2008a, 2008b). Desde então, a definição desse conjunto mínimo de parâmetros e dos critérios de aceitação dos resultados segundo princípios de BPL tem sido de grande aplicabilidade em vários estudos de microbiologia com a soja.

O caráter RR passou a ser incorporado em diversas linhagens da Embrapa, conduzindo ao próximo estudo, certamente um dos mais completos do mundo, com experimentos conduzidos em três locais da Região Sul e três da região central do Brasil, cada um com seis repetições, em três safras consecutivas. Foram definidos cinco tratamentos: T1) soja-RR + glifosato; T2) soja-RR + herbicidas convencionais; T3) soja parental convencional + herbicidas convencionais; T4) soja-RR + controle manual de ervas daninhas; e T5) soja parental convencional + controle manual de ervas daninhas. Cada ensaio utilizou três pares de cultivares parentais convencionais e suas respectivas transgênicas. Em razão da complexidade e dos mais de 100 mil dados coletados, utilizaram-se análises univariadas, multivariadas e de contraste.

---

### **IMPORTÂNCIA DOS ESTUDOS DE POTENCIAIS EFEITOS DOS OGM SOBRE A FIXAÇÃO BIOLÓGICA DE NITROGÊNIO PARA SOJA**

---

A tecnologia da inoculação da soja com bactérias diazotróficas é um dos grandes trunfos da pesquisa agropecuária brasileira. Por isso, era muito importante que os avanços da biotecnologia, que possibilitaram a geração de cultivares de soja transgênicas tolerantes a herbicidas, fossem acompanhados de estudos rigorosos, que assegurassem que a FBN na soja não seria comprometida. No ano de 2003, a Embrapa implementou sua rede de biossegurança, que avaliou a FBN em cultivares transgênicas de soja. A pesquisa, certamente uma das mais completas e detalhadas do mundo, baseou-se em experimentos conduzidos nas principais regiões produtoras de soja do Brasil, durante três anos. Com os resultados obtidos, foram gerados subsídios que possibilitaram garantir não somente a segurança ambiental, mas também o sucesso da FBN na cultura da soja no Brasil.

*Iêda de Carvalho Mendes, Embrapa Cerrados*

---

Com relação à avaliação da microbiota do solo, quatro variáveis microbianas – CBM, NBM e as atividades das enzimas beta-glicosidase (GLU) e fosfatase ácida (PA) – foram avaliadas separadamente e em conjunto. Em geral, tanto os parâmetros microbianos como a variável microbiana combinada apontaram diferenças estatísticas relacionadas ao local, à safra e ao germoplasma, mas não ao transgene ou ao tipo de herbicida (Nakatani et al., 2014). Quanto à avaliação da FBN, avaliaram-se os parâmetros de nodulação, incluindo número de nódulos (NN) e MNS, e de MPAS, NTPA e NU nos estádios V4 e R2 e o rendimento e N total dos grãos na maturidade fisiológica. Tanto os parâmetros isolados como as seis variáveis unidas em um conjunto denominado eficiência simbiótica indicaram que os principais efeitos sobre a FBN também foram relacionados ao local, à safra e ao germoplasma. Não foram detectadas diferenças estatísticas entre o manejo com herbicidas convencionais ou com o glifosato. Constatou-se que a transgenia afetou negativamente alguns parâmetros da FBN, contudo, no período de três anos, esses efeitos não impactaram significativamente o rendimento de grãos. Porém, ficou o alerta de que os efeitos de longo prazo na FBN deveriam ser monitorados. Além disso, evidenciou-se a importância da escolha de germoplasma parental com alta capacidade de FBN para mitigar prováveis impactos negativos do transgene (Hungria et al., 2014). Os resultados foram incluídos em relatório para a CTNBio e contribuíram para confirmar a segurança ambiental da soja-RR.

A Embrapa também desenvolveu eventos elite transgênicos em outra parceria privada, com a Basf, para soja contendo o gene *ahas* de resistência a herbicidas do grupo das imidazolinonas. Com a experiência adquirida anteriormente, procedeu-se ao monitoramento ambiental e à avaliação da FBN em 20 experimentos conduzidos por três safras (verão 2006/2007, safra 2007 e verão 2007/2008), em nove municípios localizados em seis estados brasileiros e no DF. Foram avaliados três tratamentos: T1) cultivar Conquista (parental) + herbicidas convencionais; T2) Cultivance (transgênica) + herbicidas convencionais; e 3) Cultivance + herbicida imazapyr. Assim como ocorreu no estudo com soja-RR, constataram-se diferenças na microbiota da soja e na FBN atribuídas ao local e à safra, mas não ao uso específico do herbicida imazapyr ou ao transgene *ahas* (Souza et al., 2013; Hungria et al., 2015). Os resultados foram incluídos e aprovados em relatório para a CTNBio e foram aceitos em fóruns de biossegurança de outros países.

## **Ações transversais importantes**

### **Boas práticas de laboratório**

Considerando a exigência internacional de que os estudos para avaliação de segurança alimentar de OGM devem ser realizados conforme os critérios de BPL e a indicação de que BPL é desejável para outros tipos de estudos comparativos, a equipe

da Rede BioSeg decidiu aplicar o conceito de BPL não somente aos laboratórios, mas, também, aos estudos de campo e gestão do projeto. Essa decisão gerou uma série de treinamentos nas diferentes Unidades da Embrapa, que já trabalhavam com registros dos dados e conceitos de qualidade, porém, identificou-se a necessidade de implementar os registros (evidências objetivas) das ações desenvolvidas, fossem treinamentos, calibração de equipamentos ou compra de insumos, reagentes ou viagens. A implementação de BPL na Rede BioSeg gerou uma mudança de comportamento que impactou positivamente não apenas a qualidade dos dados obtidos, como também a gestão do projeto, culminando com a acreditação por ISO 17000 na Embrapa Meio Ambiente e ISO 17025 na Embrapa Agroindústria de Alimentos.

---

### **A REDE BIOSEG E SUA AGILIDADE E COMPETÊNCIA**

---

A Rede BioSeg foi um dos projetos que denotaram a capacidade da Embrapa e parceiros de atuar de maneira ágil e assertiva na fronteira do conhecimento. Atuando em rede, na transversalidade (horizontalidade) dos temas que envolvem as questões de biossegurança, incluindo não somente os aspectos técnicos, mas, também, questões legais e regulatórias, e aplicando esses conhecimentos a cinco produtos pilares (verticalidade), foi possível à Embrapa e parceiros desenvolver competências (pessoas, tecnologias e serviços) para atender às demandas inerentes e específicas da integração segura de OGMs na agricultura. Porém, essa engenharia somente resultou em bons frutos (e foram vários!) porque o sistema de coliderança da rede BioSeg e a gestão absolutamente compartilhada de conhecimentos garantiram o protagonismo das ações aos efetivos protagonistas!

*Paulo Eduardo Melo – Embrapa (Secretaria de Inteligência e Relações Estratégicas)*

---

#### **Gestão interativa e inovadora**

A Rede BioSeg foi o primeiro projeto em rede da Embrapa com um comitê gestor formalizado por regimento, com procedimentos e registros para reuniões, decisões e aquisições. Uma das características mais importantes desse comitê gestor foi a designação de titulares e seus substitutos com poder de decisão na ausência do titular. Essa estrutura conferiu agilidade ao processo decisório da Rede BioSeg. Essa organização de gestão foi reconhecida com a outorga de alguns prêmios da Embrapa em 2003, 2004 e 2005. O resultado foi tão adequado que, posteriormente, a Embrapa implantou a obrigatoriedade de comitê gestor nos projetos em rede e portfólios. Destaca-se a relevância dos papéis do líder e dos secretários-executivos na implantação desse modelo. O aprendizado referente ao trabalho cooperativo envolvendo tantos e tão diferentes conhecimentos serviu de modelo para outros desafios cooperativos da

Empresa, tendo sido replicado em dezenas de outros projetos de PD&I nas dezenas de unidades descentralizadas da Embrapa e/ou em conjunto com várias outras instituições parceiras.

---

## A REDE BIOSEG E SUA AGILIDADE E COMPETÊNCIA

---

A Rede BioSeg foi um dos projetos que denotaram a capacidade da Embrapa e parceiros de atuar de maneira ágil e assertiva na fronteira do conhecimento. Atuando em rede, na transversalidade (horizontalidade) dos temas que envolvem as questões de biossegurança, incluindo não somente os aspectos técnicos, mas, também, questões legais e regulatórias, e aplicando esses conhecimentos a cinco produtos pilares (verticalidade), foi possível à Embrapa e parceiros desenvolver competências (pessoas, tecnologias e serviços) para atender às demandas inerentes e específicas da integração segura de OGMs na agricultura. Porém, essa engenharia somente resultou em bons frutos (e foram vários!) porque o sistema de coliderança da rede BioSeg e a gestão absolutamente compartilhada de conhecimentos garantiram o protagonismo das ações aos efetivos protagonistas!

*Paulo Eduardo Melo – Embrapa (Secretaria de Inteligência e Relações Estratégicas)*

---

### Marco regulatório de biossegurança

A estruturação formal da Rede BioSeg e os primeiros resultados de biossegurança alcançados por ela subsidiaram a discussão do marco regulatório de biossegurança brasileiro em uma época de enormes controvérsias (início dos anos 2000), fornecendo subsídios técnico-científicos claros e responsáveis para auxiliar os tomadores de decisão sobre o assunto. O resultado dessas discussões foi consolidado no texto atual da Lei de Biossegurança no Brasil (Lei nº 11.125/2021), que, por sua vez, serviu de modelo para discussões regulatórias sobre biossegurança no mundo todo. A experiência brasileira na regulação dos aspectos de biossegurança envolvendo OGM teve peso expressivo nas discussões internacionais sobre o tema, em especial, no âmbito do Protocolo de Cartagena (vinculado à Convenção de Diversidade Biológica), sendo que muitos pesquisadores da Rede BioSeg participaram ativamente dessas discussões, tanto em painéis de especialistas específicos como integrando as delegações brasileiras nos fóruns de discussão internacionais.

### Necessidade de capacitação

A Rede BioSeg identificou as necessidades de capacitação dos membros da rede, de colaboradores e de diversos setores. Nesse contexto, entre 2003 e 2008, além das ações de pesquisa, ações de capacitação foram estruturadas e cursos de curta duração foram oferecidas – com participação efetiva e intensa da liderança das equipes e dos colabora-

dores – , tendo como alvo pesquisadores (da Embrapa, de outras instituições públicas de pesquisa e ensino e instituições privadas) e até auditores fiscais federais agropecuários do Mapa para atuar na pesquisa, na auditoria e na fiscalização de pesquisa de OGM e fiscalizações sob suas responsabilidades. Nos cinco anos de atividade, foi possível capacitar uma equipe de mais de 60 pesquisadores e bolsistas em avaliação de risco alimentar e ambiental de OGM, bem como gerar informação para subsidiar políticas públicas.

Adicionalmente, uma disciplina de pós-graduação em Avaliação de Segurança Alimentar e Ambiental com 40 horas foi lecionada a alunos de mestrado e doutorado na Universidade Federal de Viçosa (UFV). O projeto foi encerrado em 2008, mas diversos membros da equipe continuaram atuando na área.

---

## **A REDE BIOSEG NO FORTALECIMENTO DO CONHECIMENTO CIENTÍFICO E REGULATÓRIO**

---

A rede de biossegurança contribuiu para o início da discussão no país sobre a segurança alimentar e ambiental OGM. Minha formação teórica em biossegurança começou nessa época e posteriormente me levou a participar da CTNBio como membro por seis anos. Na CTNBio, participei da criação de várias resoluções normativas para pesquisa e comercialização de OGM incluindo a recente RN 16, que normatiza a comercialização de organismos obtidos por edição gênica. Também participei da autorização comercial de dezenas de produtos transgênicos e editados. O embrião dessa jornada foi a Rede de Biossegurança.

*Eduardo Romano de Campos Pinto – Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia*

---

### **Infraestrutura**

A Rede BioSeg discutiu de maneira organizada e embasada a infraestrutura necessária para os estudos a serem realizados –fossem em atendimento aos requisitos regulatórios (antes e após a aprovação da Lei nº 11.105/2005), fossem os de laboratório ou campo. O embasamento e o organograma das prioridades permitiram obter recursos em fontes externas ou junto à Embrapa, em tempo adequado e alocados nos pontos mais nevrálgicos ou prioritários de infraestrutura.

---

## A IMPORTÂNCIA DA VISÃO DA CIÊNCIA E DE FUTURO

---

O projeto Rede BioSeg foi um esforço conjunto de diferentes Unidades, pesquisadores e analistas da Embrapa para demonstrar que o uso de organismos geneticamente modificados era absolutamente seguro, em um momento no qual, em todo o mundo e, especialmente, na sociedade brasileira, havia desconfiança sobre o uso de OGM na agropecuária. O futuro veio dar razão à proposta do projeto. O que vemos atualmente são grandes áreas ocupadas com variedades OGM no Brasil e no mundo, apesar de ainda persistirem as polêmicas sobre o tema. A visão de futuro da Rede BioSeg é um exemplo a ser seguido na ciência brasileira.

*Alberto Duarte Vilarinhos – Embrapa Mandioca e Fruticultura*

---

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

É inegável a importância da biotecnologia agrícola para o desenvolvimento da agricultura mundial. A biotecnologia vegetal afetou radicalmente a cadeia de conhecimentos e as estratégias de P&D das organizações de pesquisa para o desenvolvimento de novas cultivares, especialmente no Brasil (Machado, 2004), e o fato é que a produção mundial de plantas GM não para de crescer (International Service for the Acquisition of Agri-Biotech Applications, 2018).

Do mesmo modo, verifica-se que as precauções e inseguranças que se apresentavam no início dos anos 1980, relativas aos primeiros OGM que chegaram ao mercado, não se confirmaram, conforme atestado pela OMS<sup>22</sup> e pela FAO 2002<sup>23</sup> e demonstrado nos resultados gerados pela Rede BioSeg, além do observado nos vários anos de produção e consumo de produtos GM (Nicolia et al., 2014; Van Eenennaam; Young, 2014; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2016; Pellegrino et al., 2018; Brookes; Barfoot, 2020). Tal histórico, construído em bases científicas, permite afirmar, hoje, considerando os princípios de familiaridade e o histórico de uso seguro, que a abordagem comparativa e da natureza, caso a caso, da avaliação de segurança (ambiental e alimentar) são adequados e corroboram com Kearns et al. (2021) de que essa abordagem pode ser utilizada para tomada de decisão de risco relacionada aos produtos de biotecnologia moderna.

A Embrapa, em atendimento a sua missão social, sempre teve papel estratégico nas discussões sobre esse tema. Entre inúmeras ações inovadoras implementadas

---

<sup>22</sup> <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/food-genetically-modified>

<sup>23</sup> <http://www.fao.org/english/newsroom/news/2002/8660-en.html>

pela empresa, visando ao desenvolvimento de produtos GM seguros e alinhados aos interesses nacionais, a implementação da Rede BioSeg foi, sem dúvida, um marco institucional. Sendo entidade de pesquisa, a Embrapa desenvolve ciência para apoiar o avanço sustentável da produção de alimentos, mas ela também sofre influência das políticas vigentes. Um exemplo é o fato da relativa moratória instalada no início dos anos 2000, que resultou, entre outros fatos, na perda de oportunidade de se desenvolver um amplo estudo do impacto ambiental do cultivo da soja-RR. Dada a restrição legal de seu cultivo naqueles anos, as primeiras safras foram cultivadas ilegalmente em áreas que não eram de conhecimento dos órgãos oficiais. Portanto, as primeiras safras não foram monitoradas nem houve dados coletados. Quando definitivamente autorizada em 2005, milhares de hectares já eram cultivados com a soja-RR. Durante o debate, algumas políticas de controle foram adotadas, mas sem evidências de que os riscos alegados de fato existiam (Arantes et al., 2011).

Os resultados alcançados pelo projeto foram muito além do alcance restrito de dados sobre a segurança alimentar e ambiental dos cinco produtos-alvo trabalhados. Tão importante quanto foi a contribuição dos trabalhos da Rede BioSeg para o desenvolvimento do ambiente institucional brasileiro relacionado aos produtos GM. A execução do Projeto Rede BioSeg, baseado em uma gestão interativa, alinhando capacidades técnico-científicas com o processo de gestão institucional, tanto do ambiente interno como do externo, foi essencial para o alcance de resultados tão exitosos.

Contudo, os anos seguintes ao encerramento do projeto foram marcados pela desarticulação da equipe envolvida quanto ao trabalho em rede colaborativa, assim como pela dificuldade encontrada pela Embrapa para manter sua competitividade na geração de inovações em plantas GM. Infelizmente, não apenas a Embrapa, como outras instituições públicas brasileiras, apresentaram sérias dificuldades em finalizar o processo inovativo, sendo que a dinâmica do processo de inovação em plantas GM até hoje repete o modelo de exclusão tecnológica de instituições que não podem financiar o longo processo de liberação comercial, situação que tem impedido o desenvolvimento de produtos que não sejam commodities globais e o avanço do desenvolvimento em países menos desenvolvidos.

Os direcionamentos das inovações biotecnológicas em plantas GM continuam intimamente relacionados com as estratégias das grandes corporações mundiais do setor, que concentram seu processo de PD&I cada vez mais no desenvolvimento de produtos com forte apelo comercial e que conjugam características agronômicas com a venda de outros produtos dessas mesmas empresas. Os produtos comerciais aprovados junto à CTNBio até o momento mostram claramente que o portfólio de pesquisas dessas grandes empresas visa à solução de problemas globais (maior retorno econômico), sendo que dificilmente serão deslocados para a solução de problemas locais específicos dos países onde estão atuando (CTNBio, 2020).

O desafio, agora, tanto para a Embrapa como para as outras instituições brasileiras que atuam no setor, é buscar alianças criativas e estratégicas que possam levar não somente à superação de desafios técnico-científicos ainda não superados, alinhando interesses comerciais aos interesses nacionais. A superação desse desafio passa por alguns aspectos-chave, como a garantia de capital, uma vez que se trata de ramo do conhecimento altamente intensivo em pesquisa, capacitação técnico-científica e governabilidade do ambiente institucional onde a inovação tecnológica será inserida. É preciso capacidade organizacional para gerar conhecimentos científicos, ao mesmo tempo que se devem integrar competências institucionais para aproveitar as oportunidades que o mercado oferece.

Nesse cenário, sem dúvida, a execução de projetos de PD&I colaborativos e em rede, que reconheçam que a criação, a difusão e o uso de tecnologias GM ocorrem num contexto muito mais complexo, envolvendo processos de aprendizagem, compartilhamento de conhecimento, políticas e mecanismos de interação e de feedbacks, tanto com o ambiente interno como com o externo, é cada vez mais necessária, sendo que experiências bem-sucedidas, como a da Rede BioSeg, podem contribuir positivamente nesse sentido. Além dos aspectos técnico-científicos relatados, é importante deixar a mensagem de que existe um espaço muito importante a ser mantido pela Embrapa no que se refere à construção, com base em ciência, do ambiente regulatório e das políticas públicas que abrem espaço para o desenvolvimento do econômico, social e ambiental do país.

## REFERÊNCIAS

ALVIAR, A. N.; SANTA CRUZ, F. C.; HAUTEA, D. M. Assessing the responses of tolerant papaya (*Carica papaya* L.) varieties to *Papaya Ringspot Virus* (PRSV) infection and establishment of symptom severity rating scale for resistance screening. *Philippine Journal of Crop Science*, v. 37, n. 2, p. 20-28, Aug. 2012.

AMÂNCIO, M. C. **Sistema de inovação em plantas transgênicas no Brasil: estratégia para garantir a competitividade nacional neste setor.** 2011. 207 f. Tese (Doutorado em Ciências Genômicas e Biotecnologia) - Universidade Católica de Brasília, Brasília, DF.

ANDOW, D. A.; BARROSO, P. A. V.; FONTES, E. M. G.; GROSSI-DE-AS, M. F.; HILBECK, A.; FITT, G. P. Improving the scientific basis for environmental risk assessment through the case study of Bt cotton in Brazil. In: HILBECK, A.; ANDOW, D. A.; FONTES, E. M. G. (ed.). **Environmental risk assessment of genetically modified organisms: methodologies for assessing Bt cotton in Brazil.** Wallingford: CABI Publishing, 2006, v. 2. p. 1-20.

ARAGÃO, F. J. L. **Organismos transgênicos: explicando e discutindo a tecnologia.** Barueri-SP: Manole, 2003. 25 p.

ARANTES, O. M. N.; SILVEIRA, J. M. F. J.; BORGES, I. C.; CAPALBO, D. M. F.; SCHNEIDER, D. R. S.; GATTAZ, N. C.; LIMA, E. S. **Desenvolvimento de comunicação estratégica sobre biossegurança de plantas geneticamente modificadas: o caso do projeto LAC - Biosafety no Brasil.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. 33 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 85). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/898401>. Acesso em: 20 jan. 2021.

AZAD, M. A. K.; AMIN, L.; SIDIK, N. M. Gene technology for Papaya ringspot virus disease management. *The Scientific World Journal*, 2014, article 768038, Mar. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/768038>.

BARANSKI, R.; KLIMEK-CHODACKA, M.; LUKASIEWICZ, A. Approved genetically modified (GM) horticultural plants: a 25-year perspective. *Folia Horticulturae*, v. 31 n. 1, p. 3-49, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2478/fhort-2019-0001>.

BARROSO, P. A. V.; FREIRE, E. C.; AMARAL, J. A. B. do; SILVA, M. T. **Zonas de exclusão de algodoeiros transgênicos para preservação de espécies de *Gossypium* Nativas ou naturalizadas.** Campina Grande: Embrapa Algodão, 2005. 7 p. (Embrapa Algodão: Comunicado Técnico, 242).

BARROSO, P. A. V.; GODINHO, V. de P. C.; UTUMI, M. M. **Zona de exclusão de algodoeiros geneticamente modificados: o caso Rondônia.** Campinas: Embrapa Territorial, 2023. 22 p. (Embrapa Territorial. Documentos, 147).

BERG, P.; BALTIMORE, D.; BOYER, H. W.; COHEN, S. N.; DAVIS, R. W.; HOGNESS, D. S.; NATHANS, D.; ROBLIN, R.; WATSON, J. D.; WEISSMAN, S.; ZINDER, N. D. Potential biohazards of recombinant DNA molecules. *Science*, v. 185, n. 4148, p. 303, July 1974. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.185.4148.303>.

BERG, P.; BALTIMORE, D.; BRENNER, S.; ROBLIN, R. O.; SINGER, M. F. Summary statement of the Asilomar conference on recombinant DNA molecules. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 72, n. 6, p. 1981-1984, June 1975. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.72.6.1981>.

BRASIL. Ministério da Saúde. Organização Pan-Americana da Saúde. **Marco legal brasileiro sobre organismos geneticamente modificados**. Brasília, DF, 2010. 218 p. (Série B. Textos básicos de saúde).

BROOKES, G.; BARFOOT, P. **GM crops: global socio-economic and environmental impacts 1996-2018**. Dorchester: PG Economics Ltd, June 2020. Disponível em: <https://pgeconomics.co.uk/pdf/globalimpactfinalreportJuly2020.pdf>. Acesso em: 24 maio 2021.

BULL, A. T.; HOLT, G.; LILLY, M. D. **Biotechnology: international trends and perspectives**. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 1982. 78 p. Disponível em: <https://www.oecd.org/sti/emerging-tech/2097562.pdf>. Acesso em: 24 maio 2021.

CÂMARA, F. L. A.; CUPERTINO, F. P.; FILGUEIRA, F. A. R. Incidência de vírus em cultivares de batata multiplicadas sucessivamente em Goiás. **Fitopatologia Brasileira**, v. 11, n. 3, p. 711-716, out. 1986.

CARNEIRO, A. A.; GUIMARÃES, C. T.; VALICENTE, F. H.; WAQUIL, J. M.; VASCONCELOS, M. J. V.; CARNEIRO, N. P.; MENDES, S. M. **Milho Bt: Teoria e Prática da Produção de Plantas Transgênicas Resistentes a Insetos-Praga**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. 26 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 135).

CHITARRA, L. G. **Identificação e controle das principais doenças do algodoeiro**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2007. 65 p. (Embrapa Algodão. Cartilha 2).

COHEN, S. N.; CHANG, A. C.; BOYER, H. W.; HELLING, R. B. Construction of biologically functional bacterial plasmids in vitro. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 70, n. 11, p. 3240-3244, Nov. 1973. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.70.11.3240>.

COSTA, A. S. Increase in the populational density of *Bemisia tabaci*, a threat of widespread virus infection of legume crops in Brazil. In: BIRD, J.; MARAMOROSCH, K. (ed.). **Tropical diseases of legumes**. New York: Academic Press, 1975. p. 27-49.

COSTA, A. S. Three whitefly-transmitted virus diseases of bean in São Paulo, Brazil. **FAO Plant Protection Bulletin**, v. 13, n. 6, p. 121-130, 1965.

COSTA, A. S.; CUPERTINO, F. P. Avaliação das perdas na produção do feijoeiro causadas pelo vírus do mosaico dourado. **Fitopatologia Brasileira**, v. 1, n. 1, p. 18-25, fev. 1976.

CTNBio. **234ª reunião ordinária da comissão técnica nacional de biossegurança**. 2020. Disponível em: <http://ctnbio.mctic.gov.br/documents/566529/2269358/Pauta+234+PLENÁRIA-SETEMBRO-2020/14947a46-f40a-4b97-93fc-d32c1a255a4f?version=1.0>. Acesso em: 18 ago. 2021.

CUPERTINO, F. P.; COSTA, A. S. Avaliação das perdas causadas por vírus na produção de batata I. vírus do enrolamento da folha. **Bragantia**, v. 29, n. 31, p. 337-345, out. 1970.

DINESH, M. R.; VEENA, G. L.; VASUGI, C.; REDDY, M. K.; RAVISHANKAR, K. V. Intergeneric hybridization in papaya for 'PRSV' tolerance. **Scientia Horticulturae**, v. 161, p. 357-360, Sept. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.07.009>.

DRECHSEL, M. M. **Impacto na comunidade microbiana do solo causado pelo mamoeiro geneticamente modificado com resistência à mancha anelar**. 2006. 119 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Vegetal) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

DUSI, A. N. **O projeto de batata geneticamente modificada para resistência ao PVY**. Programa Globo Rural, 19 de julho de 2004.

DUSI, A. N.; CARVALHO, C.; TORRES, A. C.; AVILA, A. C. Resistance levels to two strains of *Potato virus Y* (PVY) in transgenic potatoes cv. Achat. **Horticultura Brasileira**, v. 19, n. 3, p. 348-350, Nov. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362001000300012>.

DUSI, A. N.; OLIVEIRA, C. L.; MELO, P. E.; TORRES, A. C. Resistance of genetically modified potatoes to Potato virus Y under field conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 9, p. 1127-1130, set. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000900009>.

FAO. **Strategies for assessing the safety of foods produced by biotechnology**: report of Joint FAO/WHO consultation. Geneva, 1991. <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/41465/1/9241561459-eng.pdf>. Acesso em: 18 de abril de 2024.

FARIA, J. C.; ALBINO, M. M. C.; DIAS, B. B. A.; CANÇADO, L. J.; CUNHA, N. B.; SILVA, L. M.; VIANNA, G. R.; ARAGÃO, F. J. L. Partial resistance to Bean Golden Mosaic Virus in a transgenic common bean (*Phaseolus vulgaris*) line expressing a mutant rep gene. **Plant Science**, v. 171, n. 5, p. 565-571, Nov. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2006.06.010>.

FARIA, J. C.; ARAGÃO, F. J. L.; SOUZA, T. L. P. O.; QUINTELA, E. D.; KITAJIMA, E. W.; RIBEIRO, S. G. Golden mosaic of common beans in Brazil: Management with a transgenic approach. **APS Features**, 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/150080/1/CNPAF-2016-APS.pdf>.

FERREIRA, E. P. B.; DUSI, A. N.; COSTA, J. R.; XAVIER, G. R.; RUMJANEK, N. G. Assessing insecticide and fungicide effects on the culturable soil bacterial community by analyses of variance of their DGGE fingerprinting data. **European Journal of Soil Biology**, v. 45, n. 5/6, p. 466-472, Sept. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2009.07.003>.

FERREIRA, E. P. B.; DUSI, A. N.; XAVIER, G. R.; RUMJANEK, N. G. Rhizosphere bacterial communities of potato cultivars evaluated through PCR-DGGE profiles. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 5, p. 605-612, maio 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000500008>.

FITCHEN, J. H.; BEACHY, R. N. Genetically engineered protection against viruses in transgenic plants. **Annual review of Microbiology**, v. 47, p. 739-763, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.47.100193.003515>.

FONSECA, M. J. O.; SOARES, A. G.; BOTREL, N.; GODOY, R. L. O.; BARBOZA, H. T. G.; FERREIRA, J. C. S.; FREITAS, S. C. Banco de dados de características de qualidade do mamão 'Sunrise Solo' cultivado no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 21, 2010, Natal. **Frutas: saúde, inovação e sustentabilidade: anais**. Natal: Sociedade Brasileira de Fruticultura, 2010a. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/35827/1/2010-077.pdf>.

FONSECA, M. J. O.; SOARES, A. G.; BOTREL, N.; GODOY, R. L. O.; BARBOZA, H. T. G.; FERREIRA, J. C. S.; FREITAS, S. C. Diferenças regionais e sazonais dos atributos de qualidade do mamão 'Sunrise Solo' cultivado no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 21, 2010, Natal.

**Frutas: saúde, inovação e sustentabilidade: anais.** Natal: Sociedade Brasileira de Fruticultura, 2010b. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/873936>.

FONTES, E. M. G.; PIRES, C. S. S.; SUJII, E. R. **Painel de especialistas sobre impactos potenciais ao meio ambiente do algodão geneticamente modificado resistente a insetos.** Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2002. 51 p. (Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. Documentos, 81). <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/184608>.

FONTES, E. M. G.; RAMALHO, F. S.; UNDERWOOD, E.; BARROSO, P. A. V.; SIMON, M. F.; SUJII, E. R.; PIRES, C. S. S.; BELTRÃO, N.; LUCENA, W. A.; FREIRE, E. C. The cotton agricultural context in Brazil. In: HILBECK, A.; ANDOW, D. A.; FONTES, E. M. G. (ed.). **Environmental risk assessment of genetically modified organisms: methodologies for assessing Bt cotton in Brazil.** Wallingford: CABI Publishing, 2006, v. 2. p. 21-66.

GEPTS, P. L.; KMIECIK, K.; PEREIRA, P. A. A.; BLISS, F. A. Dissemination pathways of common bean (*Phaseolus vulgaris*, Fabaceae) deduced from phaseolin electrophoretic variability. I. The Americas. **Economic Botany**, v. 42, n. 1, p. 73-85, Jan. 1988. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02859036>.

GILBERTSON, R. L.; FARIA, J. C.; AHLQUIST, P. G.; MAXWELL, D. P. Genetic diversity in geminiviruses causing bean golden mosaic disease: the nucleotide sequence of the infectious cloned DNA components of a Brazilian isolate of bean golden mosaic geminivirus. **Phytopathology**, v. 83, n. 7, p. 709-715, July 1993. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO-83-709>.

HAMIM, I.; BORTH, W. B.; MARQUEZ, J.; GREEN, J. C.; MELZER, M. J.; HU, J. S. Transgene-mediated resistance to *Papaya ringspot virus*: challenges and solutions. **Phytoparasitica**, v. 46, p. 1-18, Feb. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12600-017-0636-4>.

HILBECK, A.; ANDOW, D. A.; FONTES, E. M. G. (ed.). **Environmental risk assessment of genetically modified organisms: methodologies for assessing Bt cotton in Brazil.** Wallingford: CABI Publishing, 2006. v. 2.

HUNGRIA, M.; MENDES, I. C. Nitrogen fixation with soybean: the perfect symbiosis? In: DE BRUIJN, F.J. (ed.). **Biological nitrogen fixation.** New Jersey: John Wiley, 2015. p. 1009-1023. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119053095.ch99>.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. Tecnologias de inoculação da cultura da soja: mitos, verdades e desafios. In: KAPPES, C. (ed.). **Boletim de Pesquisa 2019/2020.** Rondonópolis: Fundação MT, 2019. p. 50-62. (Fundação MT. Boletim, 19).

HUNGRIA, M.; MENDES, I. C.; NAKATANI, A. S.; REIS-JUNIOR, F. B.; MORAIS, J. Z.; OLIVEIRA, M. C.; FERNANDES, M. F. Effects of glyphosate-resistant gene and herbicides on soybean crop: Field trials monitoring biological nitrogen fixation and yield. **Field Crops Research**, v. 158, p. 43-54, Mar. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.022>.

HUNGRIA, M.; NAKATANI, A. S.; SOUZA, R. A.; SEI, F. B.; CHUEIRE, L. M. O.; ARIAS, C. A. Impact of the *ahas* transgene for herbicides resistance on biological nitrogen fixation and yield of soybean. **Transgenic Research**, v. 24, n. 1, p. 155-165, Feb. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11248-014-9831-y>.

IBGE. **Censo agropecuário 2017.** Disponível em: <https://censoagro2017.ibge.gov.br/>. Acesso em: 18 ago. 2021.

IBGE. **Produção agrícola municipal**. 2019. Disponível em: [http://www.cnpmf.embrapa.br/Base\\_de\\_Dados/index\\_pdf/dados/brasil/mamao/bl\\_mamao.pdf](http://www.cnpmf.embrapa.br/Base_de_Dados/index_pdf/dados/brasil/mamao/bl_mamao.pdf). Acesso em: 27 out. 2020.

International Service for the Acquisition of Agri-Biotech Applications. **Global status of commercialized Biotech/GM crops in 2018**: biotech crops continue to help meet the challenges of increased population and climate change. Ithaca, 2018. (ISAAA Brief, 54). Disponível em: <https://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/54/download/isaaa-brief-54-2018.pdf>. Acesso em: 30 maio 2021.

JAYAVALLI, R.; BALAMOHAN, T. N.; MANIVANNAN. N.; GOVINDARAJ, M. Breaking the intergeneric hybridization barrier in *Carica papaya* and *Vasconcellea cauliflora*. **Scientia Horticulturae**, v. 130, n. 4, p. 787-794, Oct. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.09.004>.

KEARNS, P. W. E.; KLETER, G. A.; BERGMANS, H. E. N.; KUIPER, H. A. Biotechnology and biosafety policy at OECD: future trends. **Trends in Biotechnology**, Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2021.03.001>.

KING, A. M. Q.; LEFKOWITZ, E. J.; ADAMS, M. J.; CARSTENS, E. B. **Virus taxonomy**: ninth report of the International Committee on Taxonomy of Viruses. London: Elsevier, 2012. 1327 p.

LAJOLO, F. M., NUTTI, M. R. **Transgênicos**: bases científicas da sua segurança. 2. ed. São Paulo: Edusp, 2011. 200 p.

LEAL-COSTA, M. V. **Uso da anatomia foliar como ferramenta na avaliação da conformidade morfológica de cultivares geneticamente modificadas de *Glycine max* (L.) Merrill (Fabaceae) e de *Carica papaya* L. (Caricaceae)**. 2006. 130 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Vegetal) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

LEAL-COSTA, M. V.; MUNHOZ, M.; MEISSNER FILHO, P. E.; REINERT, F.; TAVARES, E. S. Anatomia foliar de plantas transgênicas e não transgênicas de *Carica papaya* L. (Caricaceae). **Acta Botânica Brasileira**, v. 24, n. 2, p. 595-597, jun. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-33062010000200030>.

LI, Y.; PENG, Y.; HALLERMAN, E. M.; WU, K. Biosafety management and commercial use of genetically modified crops in China. **Plant Cell Reports**, v. 33, n. 4, p. 565-573, Apr. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00299-014-1567-x>.

LIMA, J. A. A.; NASCIMENTO, A. K. Q.; MAIA, L. M.; LIMA, R. C. A. Plantas transgênicas no controle da mancha anelar do mamoeiro. **Anais da Academia Cearense de Ciências**, v. 1, n. 1, p. 23-38, jan./jun. 2017.

LIMA, M. A. A.; PIRES, C. S. S.; GUEDES, R. N. C.; NAKASU, E.Y.T.; LARA, M. S.; FONTES, E. M. G.; SUJII, E. R.; DIAS, S. C.; CAMPOS, L. A. O. Does Cry1Ac Bt-toxin impair development of worker larvae of Africanized honey bee? **Journal of Applied Entomology**, v. 135, n. 6, p. 415-422, July 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2010.01573.x>.

LIMA, M. C. M. **Viabilidade polínica em *Carica papaya* L. convencional e geneticamente modificada**. 2006. 120 p. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Vegetal) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MACHADO, J. Tendências futuras da biotecnologia: perspectivas para o setor do agronegócio e industrial. In: SILVEIRA, J. M. F. J.; DAL POZ, M. E.; ASSAD, A. L. (org.). **Biotecnologia e recursos genéticos: desafios e oportunidades para o Brasil**. Campinas: Instituto de Economia: FINEP, 2004. 414p

McHUGHEN, A.; SMYTH, S. US regulatory system for genetically modified [genetically modified organism (GMO), rDNA or transgenic] crop cultivars. **Plant Biotechnology Journal**, v. 6, n. 1, p. 2–12, Jan. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2007.00300.x>.

MEISSNER FILHO, P. E., VILARINHOS, A. D., OLIVEIRA, V. J. S., SILVA, D. C. S., SANTOS, V. S., DANTAS, J. L. L. Resistance of transgenic papaya trees to papaya ringspot in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 56, e01954, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.01954>.

MENASCHE, R. Os grãos da discórdia e o trabalho da mídia. **Opinião Pública**, v. 11, n. 1, p. 169-191, mar. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-62762005000100007>.

MENDES, I. C.; REIS JUNIOR, F. B.; HUNGRIA, M. A importância da avaliação da fixação biológica do nitrogênio em soja transgênica com resistência ao glifosato. In: FALEIRO, F. G.; ANDRADE, S. R. M. (ed.). **Biotecnologia, transgênicos e biossegurança**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2009. p. 146-167.

MENEZES, I. P. P.; HOFFMANN, L. V.; LIMA, T. H.; SILVA, A. R.; LUCENA, V. S.; BARROSO, P. A. V. Genetic diversity of arboreal cotton populations of the Brazilian semiarid: a remnant primary gene pool for cotton cultivars. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 3, gmr16039659, Sept. 2017. DOI: <https://doi.org/10.4238/gmr16039659>.

MIRANDA, J. E.; RODRIGUES, S. M. M.; ALBUQUERQUE, F. A.; SILVA, C. A. D.; ALMEIDA, R. P.; RAMALHO, F. S. **Guia de identificação de pragas do algodoeiro**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2015. 69 p. (Embrapa Algodão. Documentos, 255). <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1026739>.

MUNHOZ, M., LUZ, C. F. P., MEISSNER FILHO, P. E., BARTH, O. M., REINERT, F. Viabilidade polínica de *Carica papaya* L.: uma comparação metodológica. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 31, n. 2, p. 209-214, abr./jun. 2008.

NAKASU, E. Y. T.; DIAS, S. C.; PIRES, C. S. S.; ANDOW, D. A.; PAULA, D. P.; TOGNI, P. H. B.; MACEDO, T. R.; SUJII, E. R.; SÁ, M. F. G. de; FONTES, E. M. G. Biotrophic toxicity of Cry1Ac to *Cycloneda sanguinea*, a predator in Brazilian cotton. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, v. 148, n. 2, p. 105-115, Aug. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/eea.12082>.

NAKATANI, A. S.; FERNANDES, M. F.; SOUZA, R. A.; SILVA, A. P.; REIS-JUNIOR, M. F.; MENDES, I. C.; HUNGRIA, M. Effects of glyphosate-resistant gene and herbicides applied to the soybean crop on soil microbial biomass and enzymes. **Field Crops Research**, v. 162, p. 20-29, June 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.03.010>.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. **Genetically engineered crops: experiences and prospects**. Washington, DC: The National Academies Press, 2016. 584 p. DOI: <https://doi.org/10.17226/23395>.

NICOLIA, A.; MANZO, A.; VERONESI, F.; ROSELLINI, D. An overview of the last 70 years of genetically engineered crop safety research. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 34, n. 1, p. 77-88, Mar. 2014. DOI: <https://doi.org/10.3109/07388551.2013.823595>.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Environmental indicators development, measurement and use.** OECD, 2003. Disponível em: <https://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/24993546.pdf>. Acesso em: 24 mai. 2020.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Safety considerations for biotechnology.** OECD, 1992. Disponível em: <https://www.oecd.org/science/emerging-tech/2375496.pdf>. Acesso em: 24 maio 2020.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Safety evaluation of foods derived by modern biotechnology: concepts and principles.** OECD, 1993. Disponível em: <https://www.oecd.org/science/biotrack/41036698.pdf>. Acesso em: 24 maio 2020.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Safety assessment of transgenic organisms in the environment.** Volume 7: OECD Consensus documents, harmonisation of regulatory oversight in biotechnology. OECD, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264279728-en>.

PADGETTE, S. R.; KOLACZ, K. H.; DELANNAY, X.; RE, D. B.; LA VALLEE, B. J.; TINUS, C. N.; RHODES, W. K.; OTERO, Y. I.; BARRY, G. F.; EICHOLTZ, D. A.; PESCHKE, V. M.; NIDA, D. L.; TAYLOR, N. B.; KISHORE, G. M. Development, identification, and characterization of a glyphosate-tolerant soybean line. *Crop Science*, v. 35, n. 5, p. 1451-1461, Sept./Oct. 1995. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183X003500050032x>.

PAULA, D. P.; ANDOW, D. A. Uptake and bioaccumulation of Cry toxins by an aphidophagous predator. *Environmental Pollution*, v. 209, p. 164-168, Feb. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.11.036>.

PAULA, D. P.; ANDOW, D. A.; TIMBÓ, R. V.; SUJII, E. R.; PIRES, C. S. S.; FONTES, E. M. G.; MILLS, N. J. Uptake and transfer of a Bt toxin by a lepidoptera to its eggs and effects on its offspring. *PLOS One*, v. 9, n. 4, e95422, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095422>.

PAULA, D. P.; SOUZA, L. M.; ANDOW, D. A. Sequestration and transfer of Cry entomotoxin to the eggs of a predaceous ladybird beetle. *PLOS One*, v. 10, n. 12, e0144895, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144895>.

PELLEGRINO, E.; BEDINI, S.; NUTI, M.; ERCOLI, L. Impact of genetically engineered maize on agronomic, environmental and toxicological traits: a meta-analysis of 21 years of field data. *Scientific Reports*, v. 8, article 3113, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21284-2>.

PIRES, C. S. S.; SILVEIRA, F. A.; CARDOSO, C. F.; SUJII, E. R.; PAULA, D. P.; FONTES, E. M. G.; SILVA, J. P.; RODRIGUES, S. M. M.; ANDOW, D. A. Selection of bee species for environmental risk assessment of GM cotton in the Brazilian Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 49, n. 8, p. 573-586, Aug. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000800001>.

PIRES, C. S. S.; SUJII, E. R.; TOGNI, P. H. B.; RIBEIRO, P.; BERNARDES, T.; MILANE, P. V. G. N.; PAULA, D. P.; FONTES, E. M. G.; PIRES, C. S. S. Field evaluation of Bt cotton crop impact on nontarget pests: cotton aphid and boll weevil. *Neotropical Entomology*, v. 42, n. 1, p. 102-111, Feb. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13744-012-0094-0>.

REIS JUNIOR, F. B.; MENDES, I. C. As plantas transgênicas e a microbiota do solo. In: FALEIRO, F. G.; ANDRADE, S. R. M. (ed.). *Biotecnologia, transgênicos e biossegurança*. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2009. p. 121-145.

ROCHA, J. A. M.; SARTORATO, A. **Efeito da época de plantio na incidência do mosaico dourado do feijoeiro**. Goiânia: EMGOPA, 1980. 7 p. (EMGOPA. Comunicado técnico, 11).

RODRIGUES, G. S.; JESUS, K. R. E.; CAPALBO, D. M. F.; MEISSNER FILHO, P. E. **Avaliação ambiental integrada para licenciamento de operação de áreas de pesquisa (LOAP) com plantas geneticamente modificadas: estudo de caso do mamão geneticamente modificado para resistência ao vírus da mancha anelar**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2005. 55 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 30). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/13021>. Acesso em: 20 set. 2021.

ROMANO, E.; FERREIRA, A. T.; DUSI, A. N.; PROITE, K.; BUSO, J. A.; AVILA, A. C.; NISHIJIMA, M. L.; NASCIMENTO, A. S.; ALMONACID, F. B.; MENTALBERRY, A.; MONTE, D. C.; CAMPOS, M. A.; MELO, P. E.; CATTONY, M. K.; TORRES, A. C. Extreme resistance to two Brazilian strains of *Potato virus Y* (PVY) in transgenic potato cv. Achat, expressing the PVY<sup>o</sup> coat protein. **Horticultura Brasileira**, v. 19, n. 2, p. 118-122, jul. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362001000200004>.

SANCHES, N. F.; DANTAS, J. L. L. (coord.). **O cultivo do mamão**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 1999. (Embrapa Mandioca e Fruticultura. Circular técnica, 34). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/642741>. Acesso em: 10 out. 2021.

SOUZA JÚNIOR, M. T. **Analysis of the resistance in genetically engineered papaya against papaya ringspot potyvirus, partial characterization of the PRSV.Brazil.Bahia isolate, and development of transgenic papaya for Brazil**. 1999. 276 p. Tese (Doutorado) - Cornell University.

SOUZA JÚNIOR, M. T.; NICKEL, O.; GONSALVES, D. Development of virus resistant transgenic papayas expressing the coat protein gene from a Brazilian isolate of papaya ringspot virus. **Fitopatologia Brasileira**, v. 30, n. 4, p. 657-365, Aug. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-41582005000400004>.

SOUZA, R. A.; BABUJIA, L. C.; SILVA, A. P.; GUIMARÃES, M. F.; ARIAS, C. A.; HUNGRIA, M. Impact of the *ahas* transgene and of herbicides associated with the soybean crop on soil microbial community. **Transgenic Research**, v. 22, p. 877-892, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11248-013-9691-x>.

SOUZA, R. A.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; CHUEIRE, L. M. O.; BARCELLOS, F. G.; CAMPO, R. J. Avaliação qualitativa e quantitativa da microbiota do solo e da fixação biológica do nitrogênio pela soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 71-82, jan. 2008a. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000100010>.

SOUZA, R. A.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; MACIEL, C. D.; CAMPO, R. J.; ZAIA, D. A. M. Conjunto mínimo de parâmetros para avaliação da microbiota do solo e da fixação biológica do nitrogênio pela soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 83-91, jan. 2008b. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000100011>.

SUJII, E. R.; LÖVEI, G. L.; SÉTAMOU, M.; SILVIE, P.; FERNANDES, M. G.; DUBOIS, G. S. J.; ALMEIDA, R. P. Non-target and biodiversity impacts on non-target herbivorous pests. In: HILBECK, A.; ANDOW, D. A.; FONTES, E. M. G. (ed.). **Environmental risk assessment of genetically modified organisms: methodologies for assessing Bt cotton in Brazil**. Wallingford: CABI Publishing, 2006, v. 2, p. 133-154.

SUJII, E. R.; TOGNE, P. H. B.; NAKASU, E. Y. T.; PIRES, C. S. S.; PAULA, D. P.; FONTES, E. M. G. Impacto do algodoeiro Bt na dinâmica populacional do pulgão-do-algodoeiro em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 10, p. 1251-1256, out. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008001000001>.

TORRES, A. C.; FERREIRA, A. T.; MELO, P. E.; ROMANO, E.; CAMPOS, M. A.; PETERS, J. A.; BUSO, J. A.; MONTE, D. C. Batata transgênica. *Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento*, v. 2, n. 7, p. 74-77, jan./ fev. 1999.

U.S.A. Office of Science and Technology Policy. Coordinated framework for regulation of biotechnology; announcement of policy; notice for public comment. *Federal Register*, v. 51, n. 123, p. 23302-23350, June 1986.

VAN EENENNAAM, A. L.; YOUNG, A. E. Prevalence and impacts of genetically engineered feedstuffs on livestock populations. *Journal of Animal Science*, v. 92, n. 10, 4255-4278, Oct. 2014. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8124>.

WU, Z.; MO, C.; ZHANG, S.; LI, H. Characterization of papaya ringspot virus isolates infecting transgenic papaya 'huanong nº 1' in South china. *Scientific Reports*, v. 8, article 8206, 2018. DOI: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/217606>.

XAVIER, G. R.; KNUPP, A. M.; DRECHSEL, M. M.; JÚNIOR BATISTA, C. B.; BOHM, G.; ROMBALDI, C.; FARIA, J. C.; MEISSNER FILHO, P. E.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; CORREIA, M. E. F.; RUMJANEK, N. G. Biossegurança de plantas geneticamente modificadas: efeito sobre microrganismos não-alvo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 28., 2008, Londrina. FertBio 2008. Londrina: Embrapa Soja, 2008. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/217606>.

ZATERKA, L. Transgênicos e o princípio de equivalência substancial. *Estudos Avançados*, v. 33, n. 95, p. 271-284, jan./abr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2019.3395.0018>.

PARTE IV

# MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS E AGRICULTURA

*"O mundo não será destruído  
por quem pratica o mal, mas por  
quem o vigia sem fazer nada"*  
Albert Einstein



## MUDANÇA DO CLIMA E A AGENDA 2030

Ana Paula Contador Packer, Luciano Lourenço Nass, Magda Aparecida de Lima, Fernanda Garcia Sampaio, Marcelo Gomes da Silva e Sandro Eduardo Marschhausen Pereira

### INTRODUÇÃO

A agricultura sustentável e a mudança do clima são dois temas interligados e de extrema importância para alcançar os objetivos da Agenda 2030, estabelecida pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015. Essa Agenda tem por finalidade contribuir para o alcance de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), os quais são desdobrados em 169 metas que abordam diversos temas de relevância para o desenvolvimento humano e são considerados interdependentes e indivisíveis (Figura 22.1).



Figura 22.1. Temáticas abordadas nos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).  
Fonte: Adaptado de Nações Unidas Brasil (2024)

Em nível global, os sistemas alimentares enfrentam os efeitos da mudança do clima e, ao mesmo tempo, desempenham um papel ativo no agravamento da crise climática. As ações antropogênicas potencializadoras das emissões de gases do efeito estufa (GEE), aliadas a outros fatores, desempenham um papel significativo no aumento da temperatura média global. Essas mudanças têm impactos significativos na

frequência de eventos climáticos extremos, na modificação dos padrões de chuva, na perda de biodiversidade, na pressão sobre os recursos hídricos e na segurança alimentar, com impacto direto nos sistemas de produção agropecuária. As respostas a esse desafio envolvem duas estratégias essenciais: a mitigação de GEE e a adaptação à mudança do clima. Na mitigação, esforços são empreendidos para reduzir, evitar as emissões de GEE ou removê-los da atmosfera. Em contrapartida, a adaptação consiste no aumento da resiliência dos sistemas agropecuários, aumentando a capacidade de se adaptarem a eventos climáticos extremos e, assim, reduzindo sua vulnerabilidade às mudanças do clima.

É crucial analisar o impacto das mudanças climáticas na agropecuária de maneira holística, considerando diversos eixos e camadas, incluindo fatores ambientais, biológicos e socioeconômicos (Figura 22.2). Nesse contexto abrangente, a cooperação entre governos, organizações internacionais, cientistas, agricultores e outros atores relevantes torna-se fundamental. Essa colaboração é essencial para enfrentar os desafios das mudanças climáticas na agricultura, garantindo a segurança alimentar global e contribuindo de maneira significativa para o alcance dos ODS.

A Embrapa Meio Ambiente é protagonista nessa temática, e vem há anos trabalhando no desenvolvimento de pesquisa, inovação e apoio às políticas públicas para a agropecuária no contexto das mudanças do clima. O primeiro grande projeto institucional em rede nessa temática foi o Agrogases, desenvolvido no período de 2003 a 2007, que ao longo dos anos foi desdobrado em novas agendas de abrangência nacional e internacional. O Agrogases, entre outros projetos que contaram com a liderança e a participação da equipe técnica, balizaram e contribuíram diretamente com a elaboração de políticas públicas e de planos setoriais, bem como na tomada de decisões nas esferas nacional, estadual, regional e municipal no que tange às mudanças do clima.



**Figura 22.2.** Impacto das mudanças climáticas na agropecuária.

Fonte: Adaptado de Assad et al., 2019.

## ALGUMAS AÇÕES DA EMBRAPA PARA OS ODS

O documento da ONU *Transformando o nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável* estabelece uma visão extremamente ambiciosa e transformadora, em que o alimento é suficiente, seguro, acessível e nutritivo, dando ênfase às questões relacionadas à sustentabilidade social, econômica e ambiental.

A Embrapa vem atuando nessa Agenda com diversas contribuições, inclusive com a divulgação de suas atividades em *e-books*<sup>1</sup> para todos os 17 ODS. Além disso, a Embrapa tem auxiliado no estabelecimento de um arcabouço legal e colaborado com políticas públicas relevantes para a agricultura, tais quais: o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima, o Plano Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC), a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), o Programa Nacional de Solos do Brasil (Pronasolos), o Código Florestal, o Programa de Bioinsumos, o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), a Lei de Pagamentos de Serviços Ambientais (PSA), entre outras.

A importância das questões climáticas é tão relevante para o mundo que um dos ODS é direcionado especificamente ao tema. O ODS 13 – “Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos” – reconhece que a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC) é o fórum internacional intergovernamental primário para negociar a resposta global a este fenômeno.

## A PARTICIPAÇÃO DA EMBRAPA EM POLÍTICAS PÚBLICAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA NO BRASIL

Considerada uma das legislações ambientais mais complexas e avançadas globalmente, a legislação ambiental brasileira compreende mais de 2800 atos normativos e cerca de 100 leis. Criadas com o objetivo primordial de salvaguardar o meio ambiente e minimizar as consequências das atividades humanas, as leis ambientais representam um conjunto robusto de medidas. Organizadas em 24 eixos, nove dos quais se concentram diretamente em temas relacionados à interface entre agricultura e meio ambiente, essas disposições regulamentares desempenham um papel crucial ao impulsionar programas e ações diretamente vinculados a esse contexto, conforme ilustrado na Figura 22.3.

Nesse arcabouço complexo, vale destacar algumas políticas públicas e planos setoriais de grande importância para a agropecuária brasileira que contam com a participação da Embrapa Meio Ambiente, diretamente ou através de subsídios científicos.

O primeiro Código Florestal Brasileiro foi instituído pelo Decreto n. 23.793, de 23 de janeiro de 1934, revogado posteriormente pela Lei n. 4.771, de 15 de setembro de 1965,

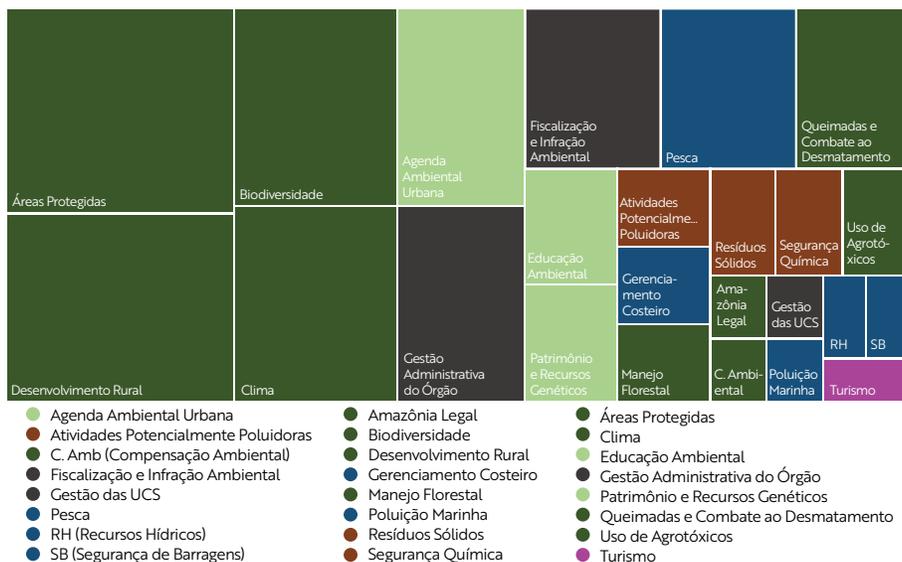
---

<sup>1</sup> Disponível em: <https://www.embrapa.br/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods/o-que-sao-os-ods>

que estabeleceu o Código Florestal vigente até a publicação da Lei Federal n. 12.651, de 25 de maio de 2012. O Novo Código Florestal Brasileiro dispõe sobre a preservação da vegetação nativa, e sobre a responsabilidade do proprietário de ambientes protegidos, entre a Área de Preservação Permanente (APP) e a Reserva Legal (RL), em preservar e proteger todos os ecossistemas.

A Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) foi criada pela Lei n. 12.187, de dezembro de 2009. A PNMC define adaptação como as “iniciativas e medidas para reduzir a vulnerabilidade dos sistemas naturais e humanos frente aos efeitos atuais e esperados da mudança do clima”. Essa política pública estabeleceu planos setoriais de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas em direção a uma economia de baixo consumo de carbono em diversos setores, entre eles o da agricultura.

A Lei n. 13.576, de 26 de dezembro de 2017, instituiu a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), com o propósito de impulsionar o crescimento da produção e uso de biocombustíveis na matriz energética brasileira. Essa política governamental reconhece a interconexão entre eficiência energética e a redução das emissões de GEE, visando facilitar a transição para uma matriz de transportes com menor impacto ambiental. Isso contribui de forma significativa para as metas globais de GEE, alinhando-se com os compromissos assumidos pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris. Além do pilar da transição energética, soma-se a certificação da produção de biocombustíveis e a implementação do Crédito de Descarbonização (CBIO).



**Figura 22.3.** Eixos temáticos da legislação ambiental, com destaque em verde aos tópicos relacionados diretamente à agricultura sustentável.

O Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC) foi um dos planos setoriais elaborados no âmbito da PNMC com a finalidade de organizar o planejamento das ações, visando à adoção de tecnologias sustentáveis de produção para responder aos compromissos assumidos pelo país em relação à redução de emissão de GEE e para o processo de adaptação do setor agropecuário. Com base nesses compromissos, o Plano ABC foi estruturado em sete programas: recuperação de pastagens degradadas; integração lavoura-pecuária-floresta e sistemas agroflorestais; sistema de plantio direto; fixação biológica do nitrogênio; florestas plantadas; tratamento de dejetos animais; adaptação às mudanças climáticas (Brasil, 2012).

O Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA) foi estabelecido pela Portaria MMA n. 150, de maio de 2016. Esse plano está organizado em 11 estratégias de adaptação: agricultura; biodiversidade e ecossistemas; cidades; desastres naturais; indústria e mineração; infraestrutura (energia, transporte e mobilidade urbana); povos e comunidades vulneráveis; recursos hídricos; saúde; segurança alimentar e nutricional; e zonas costeiras. Particularmente na agricultura, o PNA incentiva a busca por soluções mais adaptadas às condições locais, diversificando a dieta tanto em termos de oferta de alimentos quanto em relação à qualidade nutricional. Ainda, o PNA sinaliza o potencial do melhoramento genético de variedades tolerantes aos estresses abióticos, a transição de produção para sistemas mais integrados, o acesso a novas tecnologias e mecanismos de gestão que conservem os recursos naturais (Brasil, 2016).

Em novembro de 2017 foi lançado o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (PLANAVEG), pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), que tem como objetivo recuperar pelo menos 12 milhões de hectares, focando principalmente em áreas de preservação permanente (APPs) e reserva legal (RL), além de áreas degradadas com baixa aptidão agrícola (Brasil, 2017). No mesmo ano, adotando uma abordagem integrativa, o MMA apresentou a Estratégia e Plano de Ação Nacionais para a Biodiversidade (EPANB). Essa iniciativa representa uma ferramenta abrangente de gestão, coordenando ações nacionais voltadas para a conservação da biodiversidade e à utilização sustentável de seus componentes. Além disso, a EPANB se destaca como um instrumento crucial para a consecução da Meta 17 de Aichi, compromisso assumido pelo Brasil no contexto da Convenção sobre Diversidade Biológica, promovendo uma repartição justa e equitativa dos benefícios derivados do uso responsável da biodiversidade.

Em 2021, o Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) lançou o Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária com vistas ao Desenvolvimento Sustentável (2020–2030), denominado Plano ABC+, segunda fase do Plano ABC. Esse plano tem como objetivo consolidar uma agropecuária nacional fundamentada em sistemas sustentáveis, resilientes e produtivos. O

ABC+ preserva e aprimora a abordagem de desenvolvimento sustentável, incorporando a premissa de promover de forma conjunta ações direcionadas à adaptação e mitigação no setor rural. Esse destaque ratifica a posição do ABC+ como uma das mais relevantes políticas públicas nacionais para enfrentar os desafios da mudança do clima (Brasil, 2021a).

As políticas públicas nacionais que abordam direta ou indiretamente questões relacionadas à mudança do clima constituem bases importantes para a participação em discussões internacionais e, conseqüentemente, para a ratificação de acordos discutidos nas Conferências das Partes (COP) da UNFCCC, bem como em outros fóruns. Realizada anualmente desde 1995, o primeiro tema abordado foi a redução das emissões de GEE, e desde então os países têm se reunido para discutir e achar soluções para as questões climáticas.

Na 21ª Conferência das Partes (COP21), ocorrida em Paris em 2015, foi adotado um novo acordo com o objetivo central de fortalecer a resposta global à ameaça da mudança climática e reforçar a capacidade dos países para lidarem com os impactos decorrentes dessas mudanças. O Acordo de Paris foi aprovado pelos 195 países membros da UNFCCC, com a promessa de reduzir as emissões de GEE e promover o desenvolvimento sustentável. Criado para substituir o Protocolo de Kyoto (1997) a partir de 2020, o Acordo de Paris é o primeiro pacto a pressionar países a executarem planos de ação para reduzir as emissões de GEE. O compromisso é manter o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2 °C acima dos níveis pré-industriais, e envidar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais.

Na 26ª Conferência das Partes (COP26), realizada em Glasgow, na Escócia, em 2021, as partes apresentaram novas metas, de grande importância para os planos de ação climática, conforme consta nas informações das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) apresentadas pelos países. O Relatório de Síntese das metas NDCs indica que, embora haja uma evidência clara de que as emissões de GEE estão sendo reduzidas ao longo do tempo, as nações devem redobrar urgentemente seus esforços climáticos se quiserem evitar o aumento da temperatura global acima da meta do Acordo de Paris, ou seja, abaixo de 2°C, idealmente 1,5°C, até o final do século.

A 27ª Conferência das Partes (COP27), realizada em Sharm El Sheikh, no Egito, teve como diferencial propostas inovadoras, como: foco em inovação tecnológica para mitigação e adaptação às mudanças climáticas. Acordos foram firmados para a atenuação da emissão dos GEE por meio do cumprimento de diversos acordos internacionais, priorizando estratégias em médio e em longo prazo. Avanços foram feitos dentro do Programa de Trabalho de Mitigação, adotado durante a COP26, com foco em expandir a ambição e a implementação de medidas ainda nesta década (isto é, até 2030). Como resultado das discussões e acordos estabelecidos, espera-se que os países continuem a debater e aprofundar as políticas e estratégias relacionadas à adoção e

à implementação de tecnologias limpas, baseadas na natureza em diversos setores, como energia, transporte, agricultura e indústria.

O acordo final da 28ª Conferência das Partes (COP28), realizada em Dubai (30 de novembro a 12 de dezembro de 2023), foi considerado um avanço, pois, após uma maratona de negociações, os países aprovaram um acordo histórico para promover a transição energética, reduzindo o uso de combustíveis fósseis. Esse acordo de transição prevê a redução gradual do uso de combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) para diminuir a emissão de GEE, responsáveis pelas mudanças climáticas que têm impactado o planeta. Outro ponto defendido foi a possibilidade de investimentos em inovação e tecnologias com zero ou baixa emissão de carbono para fazer a transição energética, citando, entre elas, a captura de carbono. A captura ou sequestro de carbono é apontada como uma saída para minimizar o impacto dos GEE.

## REDE AGROGASES

A preocupação com a mudança climática global, com a contribuição de atividades agropecuárias às emissões de GEE e o potencial de sequestro de carbono por solos e florestas motivou a Embrapa à criação da rede de pesquisas Agrogases, para o desenvolvimento do Projeto Dinâmica de Carbono e Gases de Efeito Estufa em Sistemas de Produção Agropecuária, Florestal e Agroflorestal Brasileiros, no início de 2003.

Coordenado pela Embrapa Meio Ambiente, esse grande projeto teve como objetivo quantificar e avaliar o estoque de carbono de solos e formações florestais, bem como mensurar as emissões de GEE a partir de diferentes sistemas de produção agrícola e pecuária. O projeto foi estruturado em quatro eixos: (1) estoques de carbono no solo; (2) estoques de carbono em florestas naturais e plantações permanentes; (3) estimativa de emissão de GEE em sistemas de produção; (4) inventários de emissão de GEE, além de um projeto gerencial, que contou com a participação de equipes de 35 instituições de pesquisa, incluindo unidades da Embrapa, além de apoio financeiro de programas e órgãos de pesquisa.

Entre os resultados alcançados, destaca-se a produção de estimativas de estoques de carbono do solo para o Brasil, sob área antropizada e de vegetação natural, com base em uma base de dados (Sigsolos) organizada pela Embrapa Solos (Fidalgo et al., 2015). Sabe-se que os solos representam um importante componente no ciclo biogeoquímico do carbono, armazenando cerca de quatro vezes mais carbono do que a biomassa vegetal. No âmbito do projeto da rede Agrogases, a equipe considerou o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, que tem harmonia com o sistema da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) e os biomas nacionais. A estimativa de estoque nacional gerada resultou ser bem próxima à calculada por Bernoux et al. (2002), embora estes tenham considerado apenas os perfis

sob vegetação nativa, ou seja, representando o estado inicial antes da colonização do Brasil, em 1500. A pouca diferença das estimativas deveu-se possivelmente ao fato de que a maior parte dos estoques de carbono dos solos brasileiros concentra-se no bioma Amazônia, que se mantém em boa parte sob vegetação nativa (Fidalgo et al., 2015). Foram geradas também estimativas de carbono ( $\text{kg m}^{-2}$ ) a 0–30 cm de profundidade para vegetação original e área antropizada de cada bioma brasileiro.

A organização de inventários florestais resultou na avaliação do potencial de sequestro de carbono de diferentes sistemas florestais, incluindo florestas plantadas do Sul e Norte do país, e a Caatinga na Região Nordeste, bem como de sistemas agroflorestais brasileiros (Higa et al., 2015). O projeto contribuiu para a contabilização de estoques de carbono para importantes tipos de florestas plantadas (pinus, eucalipto, acácia e outras) por meio da criação de softwares, além de apresentar indicadores de custos, produtividade, renda e perspectivas de geração de créditos de carbono de plantios florestais de eucaliptos e pinus, com informações úteis a pequenos produtores rurais. Para sistemas agroflorestais, o projeto gerou estimativas de estoque de carbono na biomassa e no solo de Rondônia.

No eixo que tratou das emissões de GEE, destaca-se a geração de valores específicos de fatores de emissão de metano ( $\text{CH}_4$ ) e de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) para as condições nacionais, sendo os mesmos confrontados com os valores apresentados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC). Foram determinados, como exemplo, fatores de emissão de  $\text{CH}_4$  em sistemas de produção animal na bovinocultura de corte para diferentes condições de dieta, demonstrando que, com a melhoria da qualidade de forragens, é possível diminuir a produção de  $\text{CH}_4$  por unidade de carne produzida (Primavesi et al., 2012). Fatores de emissão de  $\text{CH}_4$  foram gerados também para a bovinocultura de leite com raças mestiças, que representam mais de 70% da produção de leite nacional, e raça holandesa. Para a mensuração do  $\text{CH}_4$  entérico desses ruminantes foi utilizado o método do traçador interno  $\text{SF}_6$ , adaptado por Primavesi et al. (2004), cujo treinamento foi possível com o apoio da U.S. EPA, sob a coordenação da Embrapa Meio Ambiente, o qual tem sido até hoje amplamente adotado e aprimorado por grande parte dos pesquisadores atuantes nessa temática, inclusive para caprinos e ovinos. Os fatores de emissão de  $\text{CH}_4$  gerados por fermentação entérica por gado de corte e de leite produzidos nesses estudos foram detalhados por Lima et al. (2020a).

Experimentos de mensuração de  $\text{CH}_4$ , proveniente do cultivo de arroz irrigado nas Regiões Sul e Sudeste, foram realizados pelo projeto, envolvendo manejo contínuo e intermitente de água e sistemas de plantio direto, convencional e de cultivo mínimo, gerando fatores de emissão de  $\text{CH}_4$  por arrozais, os quais encontram-se detalhados em Lima et al. (2020b). A mensuração de  $\text{CH}_4$  foi feita utilizando a técnica de câmara estática seguindo protocolo cedido pelo Dr. Ronald Sass, da Universidade de Hous-

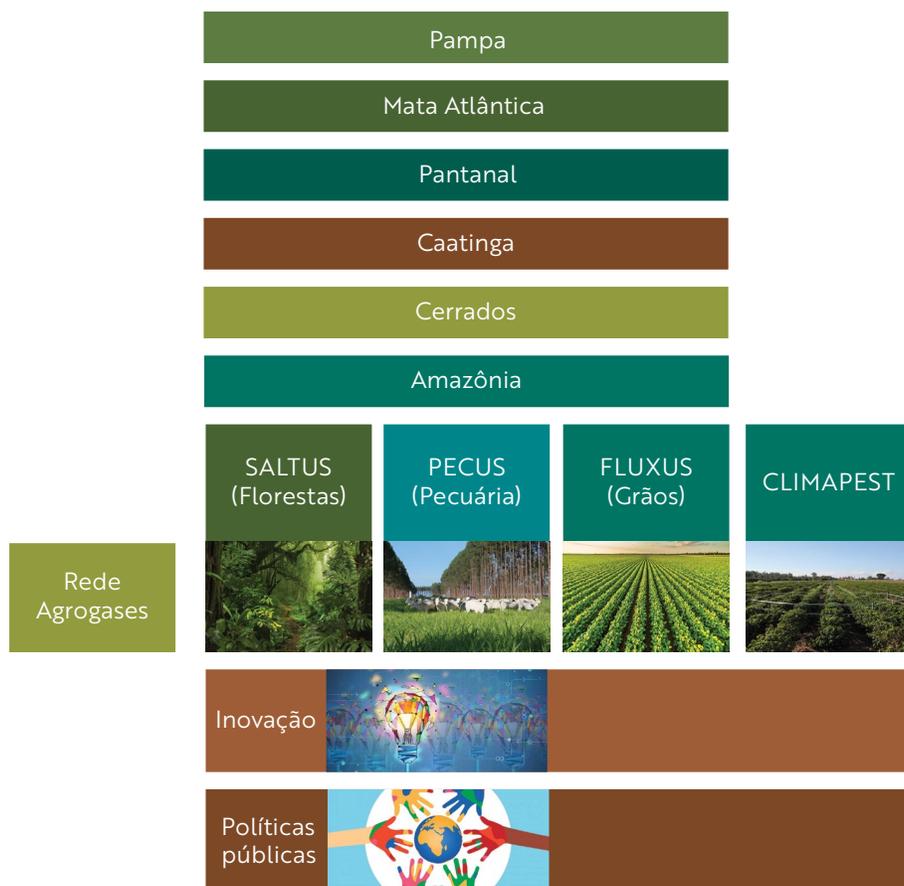
ton, EUA (Sass et al., 2002). Como resultado, concluiu-se que sistemas intermitentes tendem a diminuir a emissão de  $\text{CH}_4$  devido ao menor tempo de solo em condição inundada, e que sistemas de plantio direto e de cultivo mínimo podem constituir sistemas menos impactantes na emissão de  $\text{CH}_4$ .

Fatores de emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  foram gerados para diferentes sistemas de produção e regiões do país (Alves et al., 2015), apontando diferentes impactos de manejos agrícolas nas taxas de emissão desse gás. A maior parte dos experimentos realizados teve como objetivo a avaliação das emissões diretas de  $\text{N}_2\text{O}$  do solo. A partir desses estudos, observou-se que áreas plantadas com a cultura da soja não produziam quantidades de  $\text{N}_2\text{O}$  que justificassem a inclusão da fixação biológica de  $\text{N}_2$  como fonte direta de  $\text{N}_2\text{O}$  de solos agrícolas. As emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  podem ser muito baixas em solos mais aerados, enquanto sob condições mais úmidas do solo as emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  são estimuladas, sobretudo quando fertilizantes nitrogenados são aplicados. Considerando os resultados obtidos nos diferentes estudos realizados, encontrou-se que, em média, 0,31 % do nitrogênio (N) aplicado é emitido como  $\text{N}_2\text{O}$ . As emissões diretas de  $\text{N}_2\text{O}$  em áreas com fezes e urina bovinas mostraram-se abaixo dos valores *default* do IPCC, sendo menor a contribuição das fezes, sob condições de pastagem. Também foi mostrado que a adoção de sistemas agroflorestais para evitar a queima de capoeira na região amazônica proporciona um aumento das emissões de  $\text{N}_2\text{O}$  e NO, em razão do maior uso de fertilizantes, mas que a redução de gases com a eliminação da queima compensaria a adoção desses sistemas.

Uma parte significativa dos resultados alcançados pela rede Agrogases concentrou-se no aprimoramento dos inventários nacionais de emissão de gases de efeito estufa. Isso ocorreu tanto por meio da avaliação dos estoques de carbono no solo quanto da determinação dos fatores de emissão em sistemas de produção agropecuária. Relatórios de referência para o Inventário de Emissão de Gases de Efeito Estufa para a Segunda Comunicação Nacional para a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima foram realizados no âmbito deste projeto, com recursos do Ministério da Ciência e Tecnologia, por meio do Programa Avança Brasil (Lima et al., 2015).

Boa parte dos resultados obtidos no projeto encontram-se publicados no livro *Estoques de Carbono e Emissões de Gases de Efeito Estufa na Agropecuária Brasileira*, editado por Lima et al. (2015).

A rede formada por esse projeto, balizador de ideias e expertises, desdobrou-se em outros projetos de grande impacto para a sustentabilidade da agropecuária brasileira, considerando a complexidade de clima e de solos nos diversos biomas do Brasil (Figura 22.4). A análise dos três principais eixos da agropecuária do país – grãos, pecuária e florestas – impulsionou projetos como Fluxos, Pecuária e Saltus, e o Climapest.



**Figura 22.4.** Projetos estruturantes da rede Embrapa, focada em trazer soluções baseadas em ciência para a sustentabilidade da agropecuária brasileira.

Fonte: Adaptado de Giampaolo Queiroz Pellegrino, Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP.

Todos os esforços desse pioneirismo, principalmente da pesquisadora Magda Aparecida de Lima, culminaram no recebimento do Prêmio Nobel da Paz em 2007, compartilhado por todos os especialistas do Painel até então. Esse prêmio histórico foi resultado da participação como membro da equipe do IPCC, mais especificamente do Editorial Board of Emission Factor Database (EFDB), e como coautora do Capítulo 10 das *Diretrizes de 2006 para Inventários Nacionais de Emissões de Gases de Efeito Estufa*.

## A EMBRAPA E AS PESQUISAS RELACIONADAS ÀS MUDANÇAS DO CLIMA

A Embrapa incentivou a realização de inúmeros projetos voltados para a mensuração das emissões de GEE, abrangendo diversas unidades e equipes, em um esforço conjunto para determinar os fatores de emissão e remoção de GEE, bem como estabelecer estratégias de remoção de GEE para agricultura e pecuária brasileiras. Os resultados desses esforços foram publicados em revistas científicas, nacionais e internacionais, bem como compilados nas coletâneas de fatores de emissão e remoção de GEE da agricultura e pecuária brasileiras, organizadas pelo Mapa (Brasil, 2020, partes I e II). Esses resultados também foram desdobrados na criação e cocriação de soluções de inovação, bem como no apoio às políticas públicas.

A busca pelos assuntos sobre mudança do clima, mitigação e adaptação no banco de dados da SciVerse Scopus permitiu uma análise métrica do total das publicações nas temáticas listadas, bem como a contribuição dos pesquisadores brasileiros, da Embrapa e da Embrapa Meio Ambiente (Figura 22.5). Do total analisado, a ciência brasileira é responsável por 2,36%, a Embrapa por 0,27% e a Embrapa Meio Ambiente por 0,02%.

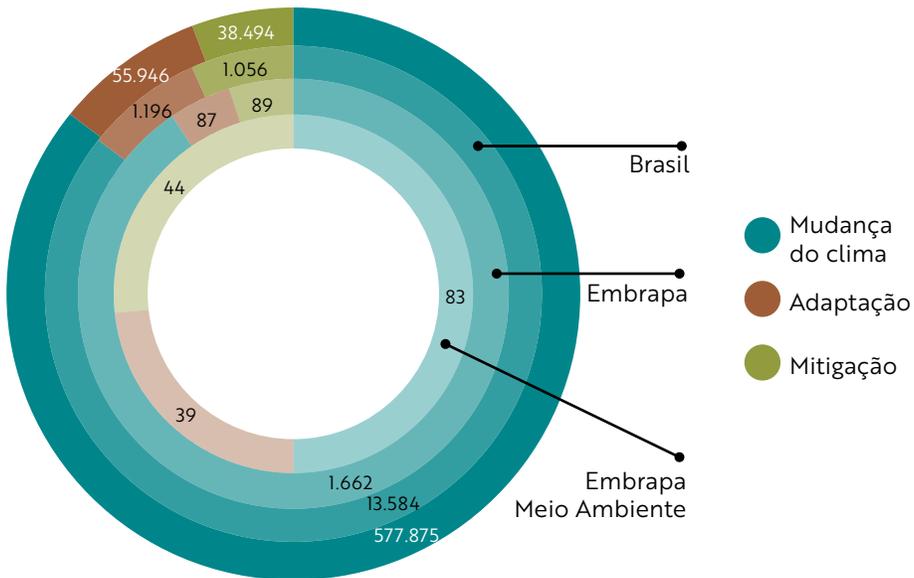
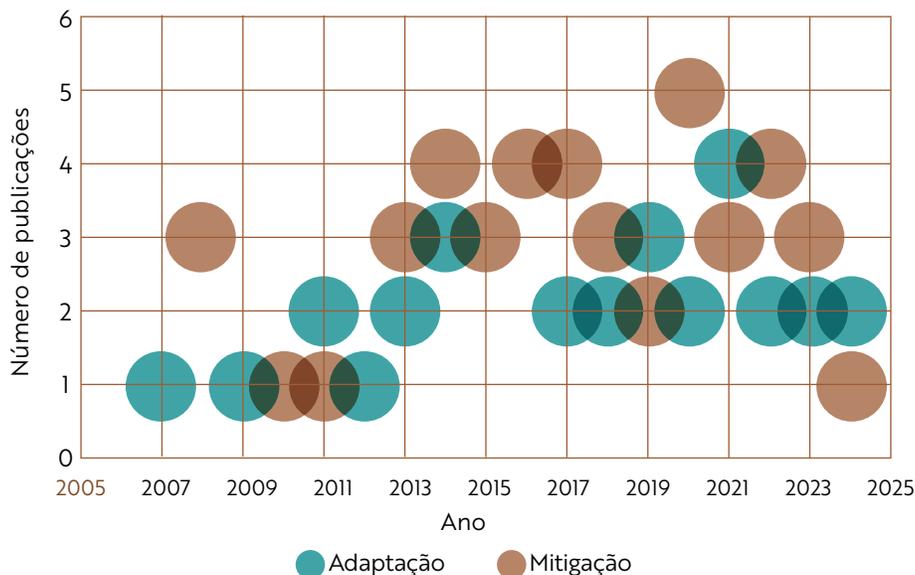


Figura 22.5. Total de trabalhos publicados em revistas especializadas internacionais, com destaque para as publicações do Brasil, da Embrapa e da Embrapa Meio Ambiente.



**Figura 22.6.** Contribuição da Embrapa Meio Ambiente, com a publicação de artigos em periódicos internacionais, abordando os temas adaptação e mitigação das mudanças do clima.

Dentro do amplo espectro de pesquisas conduzidas pela equipe da Embrapa Meio Ambiente desde 2005, cerca de 90 estudos foram publicados em periódicos internacionais. Estes têm como foco o desenvolvimento de pesquisas básicas e soluções inovadoras, bem como o apoio às políticas públicas para questões cruciais de adaptação e mitigação das mudanças climáticas, conforme ilustrado na Figura 22.6.

## MEDIÇÕES DE GEE COMO BASE CIENTÍFICA PARA AS AÇÕES DE MITIGAÇÃO

Na área da mitigação, têm sido estudados e implementados diversos processos relacionados às emissões de GEE. Isso inclui não apenas a redução direta das emissões, mas também a remoção desses gases da atmosfera e a prevenção de emissões futuras. O estudo desses processos de mitigação é essencial para desenvolver estratégias eficazes de combate às mudanças climáticas e alcançar os objetivos estabelecidos em acordos internacionais, como o Acordo de Paris. Essas medidas visam não apenas reduzir as emissões de GEE, mas também promover um desenvolvimento sustentável e resiliente ao clima.

Atividades de quantificação de GEE têm sido empreendidas no âmbito de diversos projetos de pesquisa envolvendo a equipe da Embrapa Meio Ambiente, em diferentes culturas, como cana-de-açúcar e banana, em áreas de pastagem, na aquicultura, e em estudos de biochar, arroz irrigado, dentre outros.

Para avaliar os efeitos do retorno da palha de cana-de-açúcar nas emissões de gases, foi feito em experimento de campo no qual 0%, 50%, 75% ou 100% (0 Mg/ha, 5,65 Mg/ha, 8,47 Mg/ha e 11,30 Mg/ha de biomassa seca, respectivamente) dos resíduos da cultura (palha) foram deixados no campo durante as duas primeiras safras de rebrota. Com a aplicação de fertilizantes, houve um efeito interativo entre a palha e o produto inorgânico, levando a um efeito não linear dos resíduos da cultura no fator de emissão (FE) do fertilizante. No entanto, a palha reduziu consistentemente as emissões de  $N_2O$  do campo, atuando principalmente nas áreas não fertilizadas deste. Observou-se que, considerando o FE típico usado na literatura, as emissões de  $N_2O-N$  atribuídas ao fertilizante variaram de 0,19 kg/ha a 0,79 kg/ha, enquanto as emissões totais variaram de 3,3 kg/ha a 5,2 kg/ha, da maior quantidade de palha para a menor (Silva et al., 2022). Com base neste e em outros estudos, concluiu-se que, de modo geral, o FE do fertilizante não é tão relevante quanto as emissões totais. Consequentemente, práticas de manejo podem ser mais eficazes na melhoria do balanço de GEE do que a mudança no uso de fertilizantes inorgânicos. Desta forma, manter até 11 Mg/ha de palha com uma alta relação C:N (>100:1) no local pode aumentar a sustentabilidade da produção de cana-de-açúcar, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa do campo (Pitombo et al., 2017).

Nessa mesma linha, outro projeto analisou o efeito da manutenção da palhada em solos sob cultura de cana-de-açúcar na emissão de GEE, principalmente de  $N_2O$  a partir da adubação nitrogenada (Packer et al., 2020). Os autores concluíram que a manutenção de palha sobre o solo propiciou ganhos de produtividade de colmos de cana-de-açúcar, e que as emissões de  $N_2O$  por unidade de produto (massa de colmos) nos tratamentos com níveis intermediários de palha (4,3 Mg.ha<sup>-1</sup> e 7,7 Mg.ha<sup>-1</sup> de massa seca) foram semelhantes às do solo sem palha, porém com ganhos de produtividade da cultura. Além disso, o fator de emissão (FE) relativo à fertilização nitrogenada no solo foi baixo na ausência de palha (0,03% a 0,10% do N aplicado), aumentando de 0,48% para 0,54%, quando 12 Mg.ha<sup>-1</sup> de palha foram mantidas sobre o solo. Esse FE resultou ser menor que o valor de referência do IPCC, de 1%. Essa quantificação foi feita com base no uso de câmara estática e cromatografia gasosa.

Outros estudos envolvendo também a cultura de cana-de-açúcar foram feitos com o uso do método de *eddy correlation*, que constitui uma técnica micrometeorológica para medições diretas de transporte de gases entre a superfície do solo e a atmosfera. Essa técnica é amplamente usada para quantificar taxas de emissão de  $CO_2$  a partir de ecossistemas naturais, urbanos e sistemas agrícolas, incluindo áreas de sequestro de

carbono (Burba et al., 2013). Usando essa técnica, Cabral et al. (2020) fizeram medições contínuas dos fluxos de vapor de água e de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$  em plantação comercial de cana-de-açúcar em área de colheita sem queima, e observaram que a fixação de carbono pela plantação foi capaz de neutralizar as emissões de GEE, mesmo considerando a remoção dos colmos nas colheitas e a decomposição parcial da palha depositada após a primeira colheita. Atualmente, o mesmo método está sendo aplicado em áreas de pastagem de *Urochloa brizantha* L.

Experimentos foram feitos em áreas de pastagem de *U. brizantha* L. adubada com nitrato de amônio para estimativa do fator de emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  (Carvalho et al., 2020) e sob sistema de pastejo contínuo e rotacionado (Lima et al., 2020c), apontando para valores baixos de emissão, sobretudo em condições de solo arenoso e com baixa pluviosidade. Atualmente pesquisadores da Embrapa Meio Ambiente estão realizando outros estudos, dando continuidade à mensuração de fluxos de gases em pastagens.

As bananas são frutas tropicais importantes cultivadas convencionalmente sob intensa fertilização nitrogenada. Um desafio atual é entender os impactos ambientais dessa cultura ao longo das diferentes etapas de cultivo, considerando as emissões de gases de efeito estufa. Portanto, este estudo avaliou se a fertilização inorgânica com sulfato de amônio e ureia durante diferentes estágios de plantio pode alterar as emissões de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$  do solo. O experimento foi conduzido em 2018 em uma região de Mata Atlântica no estado de São Paulo, Brasil. As emissões de  $\text{CO}_2$  seguiram as variações de precipitação. Os fluxos de  $\text{CH}_4$  foram principalmente resultado de reações de metanotrofia. Os fluxos máximos e mínimos de  $\text{N}_2\text{O}$  foram de  $7,38 \text{ mgm}^2 \text{ dia}^{-1}$  e  $-0,93 \text{ mgm}^2 \text{ dia}^{-1}$ , atingindo o pico após a fertilização nitrogenada. Os fluxos acumulados de  $\text{N}_2\text{O}$  do solo foram maiores para as duas plantações de banana do que os observados no remanescente florestal nas estações seca e chuvosa. Os picos mais altos de  $\text{N}_2\text{O}$  foram observados na plantação jovem de banana (Silva et al., 2021).

A Embrapa Meio Ambiente foi pioneira na quantificação de emissões de GEE em áreas com produção aquícola. Estudo desenvolvido desde 2013, iniciado no reservatório de Furnas (Minas Gerais), mostrou que a emissão de  $\text{CH}_4$  foi maior em áreas com criação de tilápia-do-nilo (*Oreochromis niloticus*) em tanques-rede quando comparada com áreas sem criação de tilápias (Silva et al., 2018). No mesmo estudo foi observado que a severa seca que atingiu os reservatórios brasileiros em 2013 e 2014 teve impacto direto na emissão de  $\text{CH}_4$ . A diminuição do volume útil do reservatório aumentou significativamente a emissão difusiva e ebulitiva de  $\text{CH}_4$  nas áreas com e sem criação de tilápias. Esse resultado sugere que fatores relacionados às características do reservatório podem ter maior influência na emissão de  $\text{CH}_4$  do que a produção de tilápias (Silva et al., 2018).

A influência da criação de tilápia-do-nilo na emissão de GEE também foi investigada no reservatório de Ilha Solteira, SP/MS (Silva et al., 2021). Neste estudo, para ex-

plicar a variabilidade da emissão de  $\text{CH}_4$  foi utilizada uma identificação hierárquica de parâmetros limnológicos e atmosféricos. Foi observado um aumento significativo nas emissões difusivas de  $\text{CH}_4$  comparado aos locais antes e depois dos tanques-rede, considerando o fluxo de água do interior da área em direção ao tributário principal do reservatório. Além disso, também foi observado um aumento significativo nas emissões ebulitivas de  $\text{CH}_4$  nos locais dos tanques-rede quando comparado às emissões médias dos locais antes e depois dessas estruturas. Os resultados mostraram uma diminuição nas emissões médias de  $\text{CH}_4$  após os tanques-rede em todas as áreas amostradas, o que sugere que a influência da piscicultura de tilápia nas emissões de  $\text{CH}_4$  é local. As maiores médias de emissões difusivas e ebulitivas de  $\text{CH}_4$  foram observadas em áreas com maior volume de produção de tilápia. O aumento das emissões de  $\text{CH}_4$  foi associado principalmente com maiores concentrações de carbono e fósforo na água e no sedimento, que podem estar relacionados com o acúmulo de matéria orgânica debaixo dos tanques-rede provenientes da ração não digerida pelos peixes e fezes (Silva et al., 2021).

Todo esse esforço de mensuração e de estimativas de GEE ao nível de solo-planta-atmosfera e em ambientes aquáticos ou em escala ecossistêmica, constitui uma ação fundamental para o aprimoramento de inventários nacionais e regionais de emissão de GEE, bem como para a redução de incertezas de estimativas, sobretudo para o caso do Brasil, considerando sua dimensão continental.

O conjunto de dados sobre fatores de emissão e remoção de GEE obtidos para diferentes sistemas de produção e o conhecimento gerado sobre os efeitos de práticas agrícolas e de manejo do solo, plantas e animais nas emissões, permite o uso de abordagens mais complexas de estimativa de GEE, a exemplo da modelagem e uso de simuladores. Ele permite também a identificação de medidas estratégicas de mitigação de GEE, embasando fortemente a agricultura de baixa emissão de carbono e contribuindo para o desenvolvimento sustentável da agricultura brasileira.

## ESTUDOS SOBRE O POTENCIAL DE ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS DO CLIMA

Segundo Assad et al. (2019), em sistemas agrícolas, adaptar significa adotar práticas de manejo que aproveitem a biodiversidade, os serviços ecossistêmicos e os processos ecológicos de biomas naturais ou modificados como base para ampliar a capacidade das culturas e da pecuária de se adaptar às mudanças climáticas. Os autores ressaltam que as tecnologias disponíveis no Brasil, como o melhoramento genético de plantas e de raças animais, plantio direto, fixação biológica de nitrogênio, zoneamento agrícola de risco climático, sensores digitais para avaliação de solo e planta, zoneamento agroecológico etc., são fundamentais para a permanência do Brasil como um dos principais produtores mundiais.

A Embrapa Meio Ambiente colaborou com outras instituições brasileiras na formulação de estratégias de adaptação às mudanças do clima dos sistemas agropecuários brasileiros, organizadas pelo Mapa (Brasil, 2020, partes I e II, e Brasil, 2021b)

Entre as ações de pesquisa voltadas ao conhecimento da vulnerabilidade agrícola à mudança global do clima estão os estudos sobre o efeito do aumento da concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> no crescimento das plantas e na severidade da ferrugem foliar (causada por *Hemileia vastatrix*) no café (*Coffea arabica*), utilizando câmaras *open-top* (OTC) como parte do projeto FACE Climapest (*Free Air Carbon Dioxide*) (Tozzi; Ghini, 2016). Foram utilizadas as cultivares ‘Obatã IAC 1669-20’ e ‘Catuai Vermelho IAC 144’, moderadamente resistentes e suscetíveis à doença (Figura 22.7). Tendo em vista as previsões para cenários futuros de diminuição do período de incubação para a ferrugem do cafeeiro, o estudo apontou que o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> pode contribuir para a redução da severidade da doença em determinadas cultivares de café. O projeto mostrou também que o enriquecimento atmosférico com CO<sub>2</sub> reduziu a incidência do bicho mineiro nas plantações dessa cultura.



Foto: Kátia de Lima Nechet

Figura 22.7. Experimento do FACE Climapest da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP.

Pesquisas em biotecnologia voltadas à adaptação à mudança do clima têm sido conduzidas pela Embrapa Meio Ambiente ao longo de mais de uma década, utilizando a rizobactéria *Bacillus aryabhatai*, encontrada em plantas do mandacaru, originária do bioma Caatinga, em um bioinsumo (denominado Auras) que promove tolerância à seca em plantas de soja (Braga et al., 2022) e de milho.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Embrapa Meio Ambiente conta com um longo histórico no tema de mudanças climáticas e continua atuando em diversas vertentes de pesquisa e de desenvolvimento, bem como participando ativamente da formulação de políticas públicas de grande importância para o país (Apêndice A). Sua contribuição, desde a elaboração de inventários de emissão de GEE no setor agropecuário, aplicação de avaliações de ciclo de vida para produtos chaves da economia brasileira e a sua atuação para a agricultura de baixo carbono, são contribuições relevantes da Embrapa Meio Ambiente nessa temática.

O conhecimento sobre a vulnerabilidade dos sistemas agrícolas tem sido uma questão fundamental e urgente, sendo necessário identificar indicadores e estratégias de resiliência das espécies e dos agrossistemas. Além disso, novos desafios têm sido vislumbrados, entre os quais a interação com os temas de biodiversidade, economia circular, sustentabilidade e fontes de energia renovável.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, B. J. R.; CARVALHO, A. M.; JANTALIA, C. P.; MADARI, B. E.; CABALLERO, S. S. U.; SANTOS, J. C. F.; SANTOS, H. P.; CARVALHO, C. J. R. Emissões de N<sub>2</sub>O e NO do solo em sistemas agrícolas. In: LIMA, M. A.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J.R.; MACHADO, P. L. O. A.; URQUIAGA, S. (ed.). **Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2012. 347 p.
- ASSAD, E. D.; COSTA, L. C.; MARTINS, S.; CALMON, M.; FELTRAN-BARBIERI, R.; CAMPANILI, M.; NOBRE, C. A. **Papel do Plano ABC e do Planaveg na adaptação da agricultura e da pecuária às mudanças climáticas**. *Working Paper*. São Paulo: WRI Brasil, 2019. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/publicacoes/papel-do-plano-abc-e-do-planaveg-na-adaptacao-da-agricultura-e-da-pecuaria-mudancas>. Acesso em: 18 mar. 2024.
- BERNOUX, M.; CARVALHO, M. C. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Brasil's soil carbon stocks. *Soil Science Society of America Journal*, v. 66, p. 888-896, 2002. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.888o>.
- BRAGA, A. P. A.; CRUZ, J. M.; MELO, I. S. de. Rhizobacteria from Brazilian semiarid biome as growth promoters of soybean (*Glycine max L.*) under low water availability. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 53, n. 2, p. 873-883, 2022.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Coletânea dos fatores de emissão e remoção de gases de efeito estufa da agricultura brasileira: parte I**. Brasília: MAPA/SENAR, 2020. 147 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Coletânea dos fatores de emissão e remoção de gases de efeito estufa da pecuária brasileira: parte II**. Brasília: MAPA/SENAR, 2020. 162 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Estratégias de adaptação às mudanças do clima dos sistemas agropecuários brasileiros**. Brasília: MAPA/SENAR, 2021b. 187 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono)**. Brasília, DF: MAPA/ACS 2012. 172 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030): visão estratégica para um novo ciclo/Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação**. Brasília: MAPA, 2021a. 133 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Planaveg: plano nacional de recuperação da vegetação nativa**. Brasília, DF: MMA, 2017. 73 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano nacional de adaptação à mudança do clima: volume 2: estratégias setoriais e temáticas**. Portaria MMA no. 150 de 10 de maio de 2016/Ministério do Meio Ambiente. Brasília: MMA, 2016. 2 v.
- BURBA, G.; MADSEN, R.; FEESE, K. Eddy Covariance Method for CO<sub>2</sub> Emission Measurements in CCUS Applications: Principles, Instrumentation and Software. *Energy Procedia*, v. 40, p. 329-336, 2013.

CABRAL, O. M. R.; FREITAS, H. C. de; CUADRA, S. V.; ANDRADE, C. A. de; RAMOS, N. P.; GRUTZMACHER, P.; GALDOS, M.; PACKER, A. P.; ROCHA, H. R. da; ROSSI, P. The sustainability of a sugarcane plantation in Brazil assessed by the eddy covariance fluxes of greenhouse gases. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 282-283, Article 107864, 2020.

CARVALHO, T. A. de; VASO, L. M.; LIGO, M. A. V.; BETTANIN, V. C.; ANDRADE, C. A. de Fator de emissão de N<sub>2</sub>O em pastagem de *Urochloa brizantha* L. adubada com nitrato de amônio. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 14., 2020, Campinas. *Anais...* Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2020. RE20412. p. 1-13.

FIDALGO, E. C. C.; BENITES, V. M.; WADT, P. G. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E.; MACHADO, P. L. P. A. Estoque de carbono com base no levantamento de solos do Brasil: uma contribuição para o inventário nacional. In: LIMA, M.A; BODDEY, R.M.; ALVES, B.J.R.; MACHADO, P.L.O.A.; URQUIAGA, S. (ed.). *Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira*. Brasília, DF: Embrapa, 2015. 347 p.

HIGA, R.C.V. HARON; XAUD, A.M.; ACCIOLY, L.J.O.; LIMA, R.M.B.; VASCONCELOS, S.S.; RODRIGUES, V.G.S.; CARVALHO, C.J.R.; SILVA, C.R.; LEÓNIDAS, F.C.; TONINI, H.; FERRAZ, J.B.S.; XAUD, M.R.; MOURÃO JÚNIOR, M.; COSTA, R.S.C. Estoque de biomassa em florestas plantadas, sistemas agroflorestais, florestas secundárias e caatinga. In: LIMA, M. A; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; MACHADO, P. L. O. A.; URQUIAGA, S. (ed.). *Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira*. Brasília: Embrapa, 2015. 347 p.

LIMA, M. A. de; ANDRADE, C. A. de; FRIGHETTO, R. T. S.; HERLING, V. R.; FILIZOLA, H. F.; PERES, G. R. P.; PIOTTO, V. C.; NAREZZI, F.; GRUTZMACHER, P.; BATISTA, G. das G.; SILVA, J. A. da Avaliação da emissão de óxido nitroso em pastagens sob manejo rotacional e contínuo na região sudeste do Brasil. In: GALLARDO, J. V. G. (org.). *Coletânea dos fatores de emissão e remoção de gases de efeito estufa da agricultura brasileira*. Brasília, DF: MAPA/SENAR, 2020a. p. 116-117.

LIMA, M. A.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; MACHADO, P. L. O. de A.; URQUIAGA, S. (ed.). *Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira*. 3. ed. rev. Brasília, DF: Embrapa, 2015. 343 p.

LIMA, M.A. de; FRIGHETTO, R.T. S.; LUIZ, A.J.B.; VILLELA, O. V.; BAYER, C.; MARCOLIN, E.; MACEDO, V. R. M.; EBERHARDT, D. S.; NOLDIN, J. A. Avaliação da emissão de metano proveniente do cultivo de arroz irrigado por inundação. In: GALLARDO, J. V. G. (org.). *Coletânea dos fatores de emissão e remoção de gases de efeito estufa da agricultura brasileira*. Brasília, DF: MAPA/SENAR, 2020b. p. 84-85.

LIMA, M. A. de; PRIMAVESI, O. M. A. S. P. R.; PEDREIRA, M. dos S.; DEMARCHI, J. J. A. de A.; BERCHIELLI, T. T.; OLIVEIRA, S. G. de; POSSENTI, R.A.; FRIGHETTO, R. T. S.; BERNDT, A.; MANELLA, M.Q.; FRANZOLIN, R. Dados de fatores de emissão de metano proveniente da fermentação entérica de gado de corte e de leite no Brasil. In: SOTTA, E. D.; SAMPAIO, F. G.; COSTA, M. S. N. (org.). *Coletânea de fatores de emissão e remoção de gases de efeito estufa da pecuária brasileira*. Brasília, DF: MAPA/SENAR, 2020c. p. 74-77.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. *Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil*. 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso: 21 mar. 2024.

PACKER, A. P. C.; ANDRADE, C. A. de; CANTARELLA, H.; DEGASPARI, I. A. M.; RAMOS, N. P.; ROSSETTO, R. Paradigma no manejo da palha da cana-de-açúcar: agricultura conservacionista x cogeração de energia? In: **Coletânea dos fatores de emissão e remoção de gases de efeito estufa da agricultura brasileira**. Brasília, DF: MAPA/SENAR, 2020. P. 64-65. Disponível em: [https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/fatores-nacionais-para-emissao-e-remocao-de-gases-de-efeito-estufa-na-agropecuaria-estao-em-coletanea-inedita-do-mapa/Coletanea\\_agricultura.pdf](https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/fatores-nacionais-para-emissao-e-remocao-de-gases-de-efeito-estufa-na-agropecuaria-estao-em-coletanea-inedita-do-mapa/Coletanea_agricultura.pdf). Acesso em: 18 mar. 2024.

PITOMBO, L.; CANTARELLA, H.; PACKER, A. P. C.; RAMOS, N. P.; CARMO, J. B. Straw preservation reduced total N<sub>2</sub>O emissions from a sugarcane field. *Soil Use and Management*, v. 33, p. 583-594, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12384>.

PRIMAVESI, O.; BERNDT, A.; LIMA, M. A.; FRIGHETTO, R. T. S.; DEMARCHI, J. J. A. A.; PEDREIRA, M. S. Produção de gases de efeito estufa em sistemas agropecuários: bases para inventário de emissão de metano por ruminantes. In: LIMA, M. A.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; MACHADO, P. L. O. de A.; URQUIAGA, S. (ed.). **Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2012. p. 239-270.

PRIMAVESI, O.; FRIGHETO, R. T. S.; PEDREIRA, M. S.; LIMA, M. A.; BERCHIELLI, T. T.; DEMARCHI, J. J. A. A.; MANELA, M. Q.; BARBOSA, P. F.; JOHNSON, K. A.; WESTBERG, H. H. **Técnica do gás traçador SF<sub>6</sub> para medição de campo do metano ruminal em bovinos: adaptações para o Brasil**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2004. 76 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 39).

SASS, R.; FISHER JÚNIOR, F. M.; ANDREWS, J. A. Spatial variability in methane emissions from a Texas rice field with some general implications. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 16, p. 15-15-7, 2002.

SILVA, M. G. da; PACKER, A. P.; SAMPAIO, F.G.; MARANI, L.; MARIANO, E. V. C.; PAZIANOTTO, R. A. A.; FERREIRA, W. J.; ALVALÁ, P. C. Impact of intensive fish farming on methane emission in a tropical hydropower reservoir. *Climatic Change*, v. 150, p. 195-210, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2281-4>.

SILVA, M. G. da; SAMPAIO, F. G.; TANIWAKI, R. H.; BARROS, N. O.; ALVALÁ, P. C.; BETTANIN, V. C.; GAROFALO, D. T.; COSTA, D. O. da; AYER, J. E. B.; GONDEK, T. P.; PACKER, A. P. Increase of methane emission linked to net cage fish farms in a tropical reservoir. *Environmental Challenges*, v. 5, 100287, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100287>.

SILVA, R. B.; ANTUNES, T.; ROSA, J. S.; PACKER, A. P.; BENTO, C. B.; CARMO, J. B.; SILLVA, F. A. M. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions after fertilizer application in banana plantations located in the Brazilian Atlantic Forest. *Soil Use and Management*, v. 38, n. 4, p. 1597-1613, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12822>.

TOZZI, F. R. O.; GHINI, R. Impacto do aumento da concentração atmosférica do dióxido de carbono sobre a ferrugem e o crescimento do cafeeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 51, n. 8, p. 933-941, ago. 2016.

## Apêndice A - Atuação da Embrapa Meio Ambiente no tema de mudanças climáticas

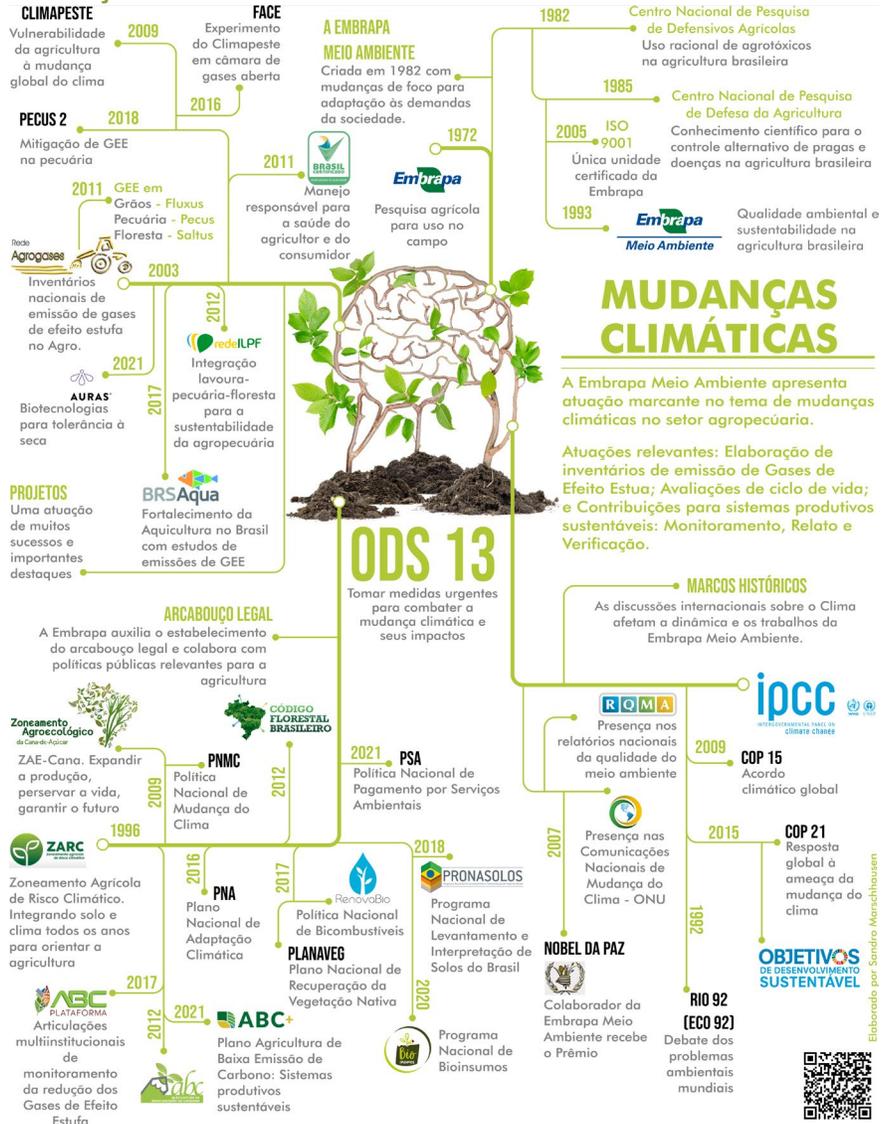


Figura 22.A. Mindmap da atuação da Embrapa Meio Ambiente no tema de mudanças climáticas. Ilustração: Sandro Eduardo Marschhausen Pereira.

# PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEUS IMPACTOS NA DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DE DOENÇAS E PRAGAS AGRÍCOLAS

*Emília Hamada, Francislene Angelotti, Kátia Regiane Brunelli, Renata Ribeiro do Valle Gonçalves, Alejandro Mario Rago e Wagner Bettiol*

## INTRODUÇÃO

As mudanças recentes no clima são rápidas, generalizadas e intensas, afetando atmosfera, oceano, criosfera e biosfera de maneira sem precedentes ao longo de milhares de anos, e com inequívoca influência humana no aquecimento da atmosfera, do oceano e da terra (IPCC, 2021). Nesse Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC, foram definidos cinco cenários para o futuro: cenários com altas emissões de gases de efeito estufa e CO<sub>2</sub> (pessimistas), nos quais o aquecimento global no século XXI superaria 2 °C em relação ao período de 1850 a 1900; cenário intermediário de emissões, com provável aquecimento global de 2 °C; e cenários otimistas, com baixa emissão de gases de efeito estufa e CO<sub>2</sub>, nos quais seria improvável um aquecimento global de 2 °C. No entanto, os efeitos do aquecimento global já podem ser sentidos. A temperatura da superfície global aumentou mais rapidamente desde 1970 do que em qualquer outro intervalo de 50 anos nos últimos 2.000 anos (alta confiabilidade), e, na década mais recente (2011–2020), as temperaturas excederam 0,2 °C a 1,0 °C em relação a 1850–1900, considerado o período anterior mais quente em pelo menos 6.500 anos (média confiabilidade) (IPCC, 2021).

As mudanças globais representam um desafio sem precedentes para a biosfera mundial e para a comunidade global, afetando os ecossistemas e os sistemas de produção agrícola em todo o mundo (IPPC Secretariat, 2021). Para a agricultura e a proteção de plantas, as alterações no clima podem promover significativas modificações na ocorrência e na severidade de doenças e pragas agrícolas, alterando a distribuição dos problemas fitossanitários em todo o mundo, com graves consequências econômicas, sociais e ambientais.

Prever a nova distribuição geográfica e temporal dos problemas fitossanitários pode contribuir com a proteção de plantas de maneira significativa, antevendo solu-

ções que sejam mais adaptadas aos novos cenários. Neste capítulo serão apresentadas as principais contribuições técnicas produzidas pela Embrapa Meio Ambiente e seus parceiros para a distribuição geográfica e temporal das doenças e pragas, visando à proteção da saúde das plantas. Também procura-se avançar à luz do conhecimento atual, identificando os desafios e perspectivas futuras.

## EVOLUÇÃO DOS ESTUDOS COM MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PROBLEMAS FITOSSANITÁRIOS

No Brasil, o primeiro livro sobre mudanças climáticas e doenças de plantas foi publicado em 2005 pela Dra. Raquel Ghini (em memória), pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, cujo livro, intitulado *Mudanças climáticas globais e doenças de plantas*, apresentou a revisão sobre o assunto, com discussões sobre a importância da realização de pesquisas nas condições ambientais brasileiras. Essa obra pioneira serviu de inspiração e base para a abertura de novas linhas de pesquisa na área de proteção de plantas no Brasil, incluindo os impactos das mudanças climáticas na distribuição geográfica e temporal de problemas fitossanitários no país, que se iniciaram nesse período.

A publicação do Terceiro Relatório de Avaliação (TAR) pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) (Houghton et al., 2001) foi relevante para os estudos iniciais sobre os efeitos das mudanças climáticas na distribuição de doenças e pragas. Os relatórios de avaliação começaram a ser disponibilizados em 1990, mas somente a partir de 2001, no âmbito das projeções do clima futuro, foi verificada considerável melhoria no conhecimento sobre os processos do clima incorporado aos modelos climáticos globais, aumentando a complexidade e confiabilidade de suas projeções. Desta forma, a disponibilidade de informações mais confiáveis sobre as projeções do clima futuro nos cenários de mudanças climáticas possibilitou sua utilização em diversos campos de pesquisa.

A utilização das projeções futuras do IPCC para aplicação em estudos de distribuição geográfica constituiu-se um grande desafio, pois demandou o estabelecimento de metodologia para a estruturação dos dados climáticos. As informações passaram por diversas fases, desde a organização em cenários, a integração das projeções dos diferentes modelos climáticos globais de distintas instituições do mundo e dos períodos futuros, definidos para as simulações mensais das variáveis climáticas, até o intenso e cuidadoso trabalho no processamento computacional das informações. O detalhamento desse processo está apresentado no item “Projeções do IPCC”.

Com base nas projeções do IPCC, diversos estudos foram realizados. Na Tabela 23.1 estão apresentadas, em ordem cronológica, as principais publicações de livros e

séries da Embrapa Meio Ambiente abordando os impactos das mudanças climáticas na distribuição geográfica e temporal de problemas fitossanitários. Além dessas, outras publicações serão discutidas.

**Tabela 23.1.** Cronograma das principais publicações de livros e série da Embrapa Meio Ambiente sobre impactos das mudanças climáticas sobre problemas fitossanitários.

Ano – tipo da publicação	Título	Referência
2005 – Livro	Mudanças climáticas globais e doenças de plantas	Ghini (2005)
2008 – Livro	Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil	Ghini e Hamada (2008)*
2010 – Série	Atlas digital dos cenários climáticos futuros projetados para o Brasil com base no Terceiro Relatório do IPCC (2001): variáveis de interesse agrícola	Hamada et al. (2010)
2011 – Livro	Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil	Ghini et al. (2011a)
2013 – Série	Atlas digital dos cenários climáticos projetados para o Brasil com base no Quarto Relatório do IPCC (2007): variáveis de interesse agrícola	Hamada et al. (2013)
2014 – Livro	Climate change: impacts on plant diseases in Brazil	Ghini e Hamada (2014)*
2013 - Anais	Impactos das mudanças climáticas globais sobre problemas fitossanitários: descrição e resultados	Ghini e Hamada (2013)
2017 – Livro	Aquecimento global e problemas fitossanitários	Bettiol et al. (2017)

\* Publicado em parceria com a Embrapa Informação Tecnológica.

O livro organizado por Ghini e Hamada (2008) apresentou discussões sobre os possíveis impactos das mudanças climáticas globais sobre doenças de importantes culturas do Brasil. Para tanto, foram elaborados mapas para o Brasil, a partir das projeções dos modelos climáticos globais dos cenários futuros disponibilizados no TAR do IPCC. Os mapas do Brasil continham dados mensais de temperatura média, máxima e mínima (°C), precipitação (mm/dia), umidade relativa (%) e radiação solar (W/m<sup>2</sup>) para as condições de referência de 1961 a 1990 e futuras (cenários A2 e B2, projetados para as décadas centradas em 2020, 2050 e 2080), conforme procedimento apresentado por Hamada et al. (2008). Considerando as alterações previstas da distribui-

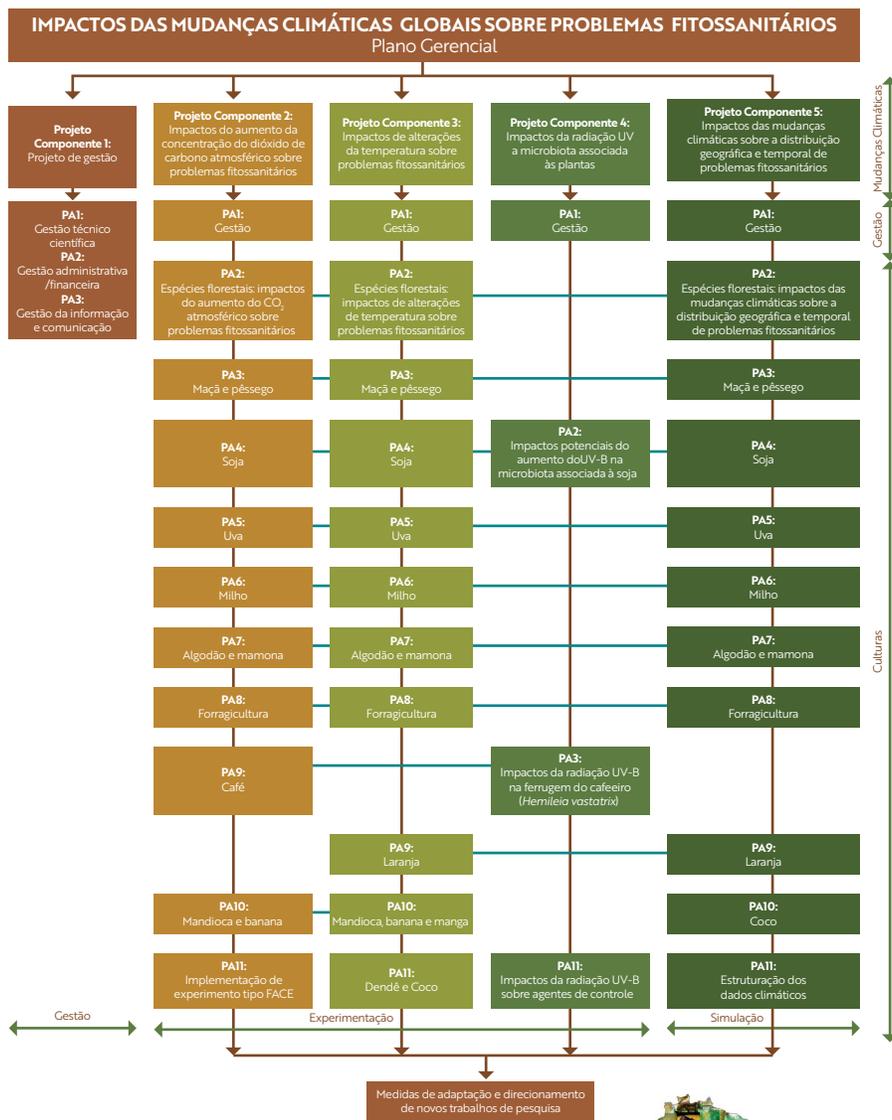
ção geográfica do clima para o Brasil, os capítulos foram redigidos relacionando as informações climáticas e epidemiológicas e dados disponíveis na literatura, além da experiência dos autores com os problemas fitossanitários das culturas nas diferentes regiões brasileiras. No livro são apresentadas detalhadas discussões sobre o impacto dos novos cenários em doenças da batata, do tomate, pimentão, melão, arroz, cereais de inverno, milho soja, banana, cana-de-açúcar, café, citros e seringueira. Também são discutidos os efeitos sobre os fitonematoides, os agentes de controle biológico e o controle químico. Essa publicação foi posteriormente traduzida para a língua inglesa (Ghini; Hamada, 2014), ampliando o acesso de leitores de outros países.

O livro de Ghini e Hamada (2008) despertou grande atenção por parte dos fitopatologistas, agrônomos e profissionais ligados ao setor, e um aumento no número de trabalhos de pesquisa e de iniciativas de discussões a respeito do assunto foi observado, tanto no Brasil quanto em outros países. Dentre os projetos, o marco foi o “Impactos das mudanças climáticas globais sobre problemas fitossanitários” (Climapest), iniciado em 2009, que participou do Sistema Embrapa de Gestão da carteira de projetos de pesquisa do Macroprograma 1 - Grandes Desafios Nacionais, e foi liderado pela Embrapa Meio Ambiente. O projeto contou com a participação de 134 membros, de 39 instituições, sendo 17 Unidades da Embrapa e 22 instituições parceiras, entre Universidades, Institutos de pesquisa e Empresas privadas. O projeto contemplou trabalhos de experimentação (abordado no capítulo “Mudanças Climáticas e problemas fitossanitários”) e de simulação, com mapas de distribuição geográfica e temporal das culturas de soja, café, milho, laranja, forragicultura, espécies florestais, maçã, pêssego, banana, manga, uva, mandioca, algodão, mamona, coco, dendê, cana-de-açúcar, amendoim, arroz e feijão (Figura 23.1). A descrição e os principais resultados do projeto foram reunidos em Ghini e Hamada (2013), contemplando a listagem de artigos, livros, capítulos de livro, séries da Embrapa, teses e trabalhos em anais de eventos, os eventos e os projetos de pesquisa relacionados.

Motivados pelo crescente interesse do público em geral pelo tema de mudanças climáticas no Brasil, Hamada et al. (2010) organizaram o Atlas dos mapas mensais de variáveis climáticas de interesse agrícola, para o período de referência de 1961 a 1990, e dos cenários A2 e B2 para 2020, 2050 e 2080, com base no TAR do IPCC (2001), disponibilizando figuras, tabelas e dados originais de precipitação pluvial e temperatura média do ar, com recorte para a América do Sul, permitindo consultas de forma mais dinâmica e com melhor qualidade visual.

Uma das atividades do projeto Climapest para o estudo da distribuição geográfica foi a estruturação dos dados climáticos, considerando os modelos climáticos globais apresentados no Quarto Relatório de Avaliação (AR4) do IPCC (2007). Esses dados serviram de base para as discussões de um novo livro, publicado e organizado por Ghini et al. (2011a). Esse livro seguiu o mesmo procedimento do livro de

2008 (Ghini; Hamada, 2008), considerando os mapas do clima futuro para o Brasil e relacionando-os com as informações epidemiológicas da literatura e a experiência dos autores, contemplando novas culturas de importância econômica e social para o Brasil: abacaxi, acácia-negra, alface, brássicas, cajueiro, cebola, coqueiro, eucalipto, fruteiras de caroço, mamoeiro, mandioca, mangueira, morangueiro, pinus, sorgo e videira. Além disso, também foram discutidos os efeitos sobre a ocorrência de epidemias de doenças e sobre doenças bacterianas no Brasil. O processo de estruturação da base de dados climática do AR4 do IPCC está descrito em Hamada et al. (2011a). Também foi elaborado um Atlas por Hamada et al. (2013), para consulta e visualização dos mapas mensais de seis variáveis (temperatura média (°C), temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), precipitação (mm/dia), umidade relativa (%) e período de molhamento foliar (h/dia)) para o período de referência de 1961–1990 e dos cenários A2 e B1 para os períodos de 2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100, incluindo tabelas e dados originais de precipitação pluvial e temperatura média do ar, com recorte para o Brasil.



## ESQUEMA DO PROJETO

Figura 23.1. Organograma do projeto Climapest.



O livro organizado por Bettiol et al. (2017), seguindo a base climática do AR4 do IPCC, apresentou pela primeira vez capítulos que trataram dos efeitos do aquecimento global sobre pragas, que, apesar da sua grande importância, ainda não tinham sido abordados anteriormente. Temas gerais como a Fitopatologia e a Entomologia nos cenários de aquecimento global, os efeitos do aumento da temperatura e do déficit hídrico nas doenças de plantas, os efeitos sobre a quebra de resistência genética a doenças em hortaliças, além do impacto sobre a comunidade microbiana do solo, também receberam atenção. Neste livro, a discussão sobre ferrugem do cafeeiro, pragas da cana-de-açúcar, pragas em oleaginosas e pragas das pastagens considerou as informações climáticas dos mapas do clima futuro para o Brasil, relacionando-as a dados epidemiológicos da literatura e à experiência dos autores, em uma abordagem descritiva. Para as ferrugens do milho e do eucalipto, o cancro-bacteriano da videira, pragas do algodoeiro, do eucalipto, do pessegueiro e do mogno, e exemplos pontuais de pragas em oleaginosas e pastagens, as avaliações do impacto foram feitas com base em modelagem. Nesses estudos, foram aplicadas as informações climáticas do clima futuro, estruturadas no banco de dados geográfico de Sistema de Informações Geográficas (SIG) em modelos matemáticos ou equações de lógica matemática, definidos na literatura e na experiência dos autores, resultando em mapas preditivos da variável resposta, tais como severidade da doença, número de ciclos, número de gerações, favorabilidade de ocorrência etc.

O primeiro trabalho sobre a abordagem por modelagem para obtenção de mapas de distribuição geográfica de problemas fitossanitários de plantas foi realizado por Hamada et al. (2006). Utilizando o modelo biológico do bicho-mineiro-do-cafeeiro (*Leucoptera coffeella*) e associando-o às alterações climáticas futuras no Brasil, foram comparados dois processos de elaboração de mapas. O primeiro seguiu o modelo de incrementos constantes de temperatura, precipitação e outras variáveis climáticas para as condições climáticas futuras. Essa abordagem foi a pioneira no mundo para análise sobre mudanças na distribuição geográfica e temporal dos problemas fitossanitários, frente a possíveis alterações de clima. A temperatura foi a variável de entrada do modelo.

Para o segundo processo, as informações de temperatura foram tiradas diretamente das projeções dos modelos climáticos globais, disponibilizadas pelo TAR, centrados na década de 2080, cenário A2, que variaram espacialmente. Em ambos os processos de elaboração de mapas foram observados aumentos no número provável de ciclos do bicho-mineiro no futuro. No entanto, a utilização de incrementos constantes de temperatura média levou a subestimar o número de ciclos vitais do inseto no futuro, comparada à utilização de incremento de temperatura variando espacialmente das projeções do TAR. Desta forma, além de observar a diferença sazonal, foi possível verificar a diferença regional de ocorrência do número de ciclos do bicho-

-mineiro com estimativas mais precisas, adotando-se o processo com incrementos de temperatura variando espacialmente.

## PROJEÇÕES DO IPCC

As projeções recentes do IPCC estimam o aquecimento entre 1,5 °C a 2 °C, na média global, que será excedido durante o século XXI, a menos que reduções drásticas na emissão de CO<sub>2</sub> e outros gases de efeito estufa ocorram nas próximas décadas (IPCC, 2021). Estimativas e alertas como esse são disponibilizados de forma periódica pelo IPCC, desde 1990, por meio de suas avaliações, elaboradas e revisadas em diversas etapas, garantindo objetividade e transparência. Nos relatórios de avaliação, o IPCC determina o estado atual do conhecimento sobre as mudanças climáticas, identifica os acordos na comunidade científica sobre tópicos relacionados às mudanças climáticas, e em que âmbitos mais pesquisas serão necessárias.

O IPCC disponibiliza também as simulações de diversos e sofisticados modelos globais de circulação atmosférica, desenvolvidos por renomadas instituições do mundo e executados de acordo com os diferentes cenários futuros. Esses modelos são baseados em princípios físicos bem estabelecidos e descrevem características do clima recente e alterações do clima passado, e, com considerável confiança, fornecem estimativas quantitativas da mudança do clima futuro (Randall; Wood, 2007).

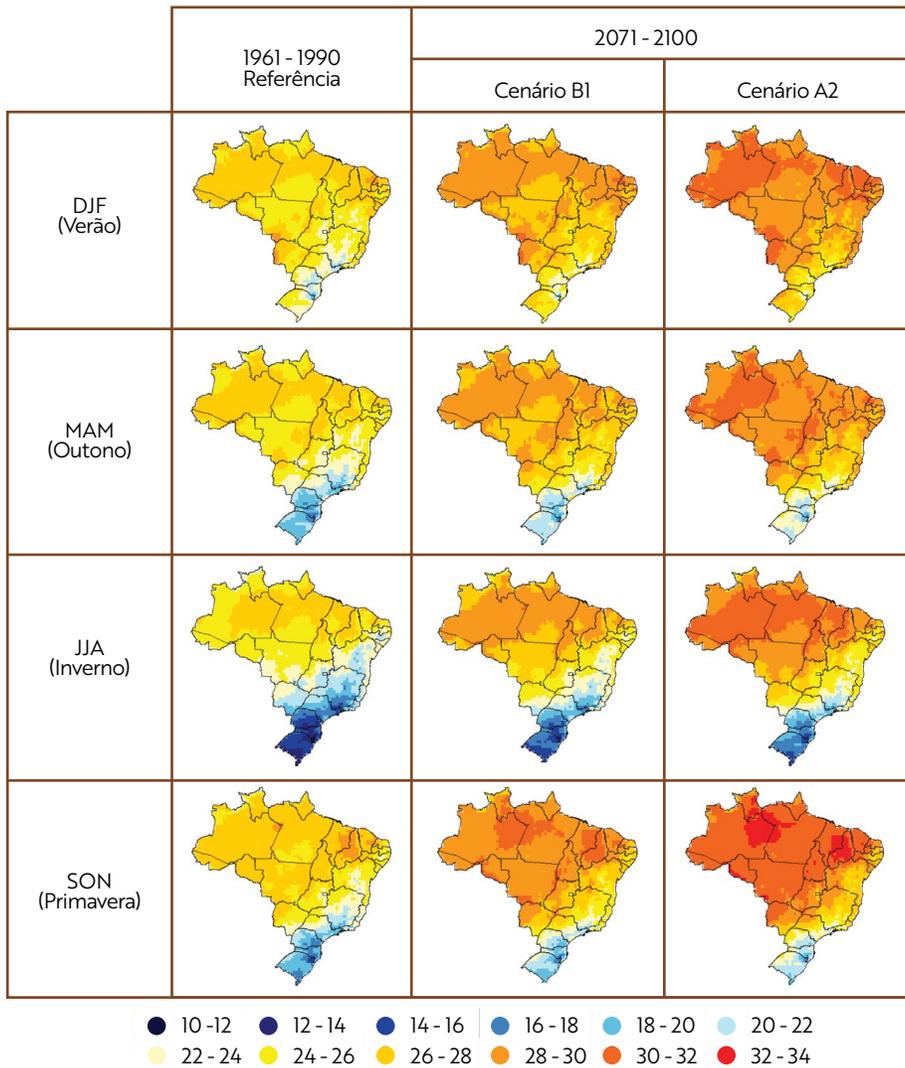
A utilização das projeções dos modelos climáticos, juntamente com as informações adicionais obtidas de dados observados, possibilita prever com base quantitativa a ocorrência das mudanças do clima do futuro. Assim, esta é uma importante ferramenta na avaliação dos efeitos das alterações do clima, e foram utilizados nos estudos de impactos das mudanças climáticas na distribuição geográfica e temporal de problemas fitossanitários pela Embrapa Meio Ambiente. No período de 2005 a 2017, as publicações relacionadas ao tema foram baseadas nas projeções dos modelos globais disponibilizados nos relatórios de avaliação do TAR e AR4 (IPCC, 2001, 2007), conforme ilustra a Figura 23.2.

No livro de Ghini e Hamada (2008), as discussões foram baseadas nos mapas climáticos confeccionados a partir das projeções do TAR do IPCC. Foram escolhidos dois cenários climáticos futuros para o Brasil: A2 (mais pessimista) e B2 (mais otimista) e projeções originalmente integradas nas décadas de 2020 (2010–2039), 2050 (2040–2069) e 2080 (2070–2099). Os mapas dos cenários futuros foram resultantes da média das respostas de seis modelos climáticos globais de previsões futuras, disponibilizados pelo Data Distribution Centre (DDC) ([http://www.ipcc-data.org/sim/gcm\\_clim/SRES\\_TAR/index.html](http://www.ipcc-data.org/sim/gcm_clim/SRES_TAR/index.html)) do IPCC. Os dados das variáveis climáticas foram inseridos no banco de dados do SIG, adotando-se o sistema de coordenadas geográficas (latitude e longitude) e ajustando os mapas para a resolução espacial de 0,5° X 0,5° (Hamada et al., 2008; Hamada et al., 2010).



Figura 23.2. Linha do tempo das publicações de mudanças climáticas e problemas fitossanitários (Ghini, 2005; Ghini; Hamada, 2008; Hamada et al., 2010; Ghini et al., 2011a; Hamada et al., 2013; Bettiol et al., 2017) e os relatórios de avaliação do TAR e AR4 do IPCC (2001, 2007).

Para as discussões baseadas nas projeções do AR4 do IPCC (Ghini et al., 2011a; Bettiol et al., 2017), também foram selecionados os cenários A2 e B1 de emissão de gases de efeito estufa e simulações disponibilizadas originalmente ano a ano até 2100. Desta forma, uma etapa complementar foi integrar os dados para os períodos de 2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100 e os mapas do clima futuro para o Brasil. Os dados foram obtidos da média aritmética das projeções de quinze modelos climáticos globais, selecionados entre os mais de vinte disponibilizados pelo DDC ([http://www.ipcc-data.org/sim/gcm\\_clim/SRES\\_AR4/index.html](http://www.ipcc-data.org/sim/gcm_clim/SRES_AR4/index.html)) do IPCC. Uma correção de viés para minimizar a divergência entre os valores observados e as correspondentes projeções retrospectivas dos modelos, obtendo-se as projeções corrigidas, foi também adotada (Hamada et al., 2011a; Hamada et al., 2013; Hamada et al., 2017). Utilizando a base de dados estruturada das projeções climáticas, foi possível verificar alterações do clima no Brasil, de forma quantificada. Por exemplo, a Figura 23.3 apresenta os mapas de temperatura média do ar, cujas informações mensais foram agrupadas por estações do ano. No futuro, a média dos modelos do AR4 projeta o aquecimento em todas as regiões do país, com incremento na média de 3,4 °C no verão, 3,5 °C no outono; 3,8 °C no inverno e 3,9 °C na primavera para 2071–2100, cenário A2, baseado no período de referência de 1961–1990 (Hamada; Ghini, 2015).

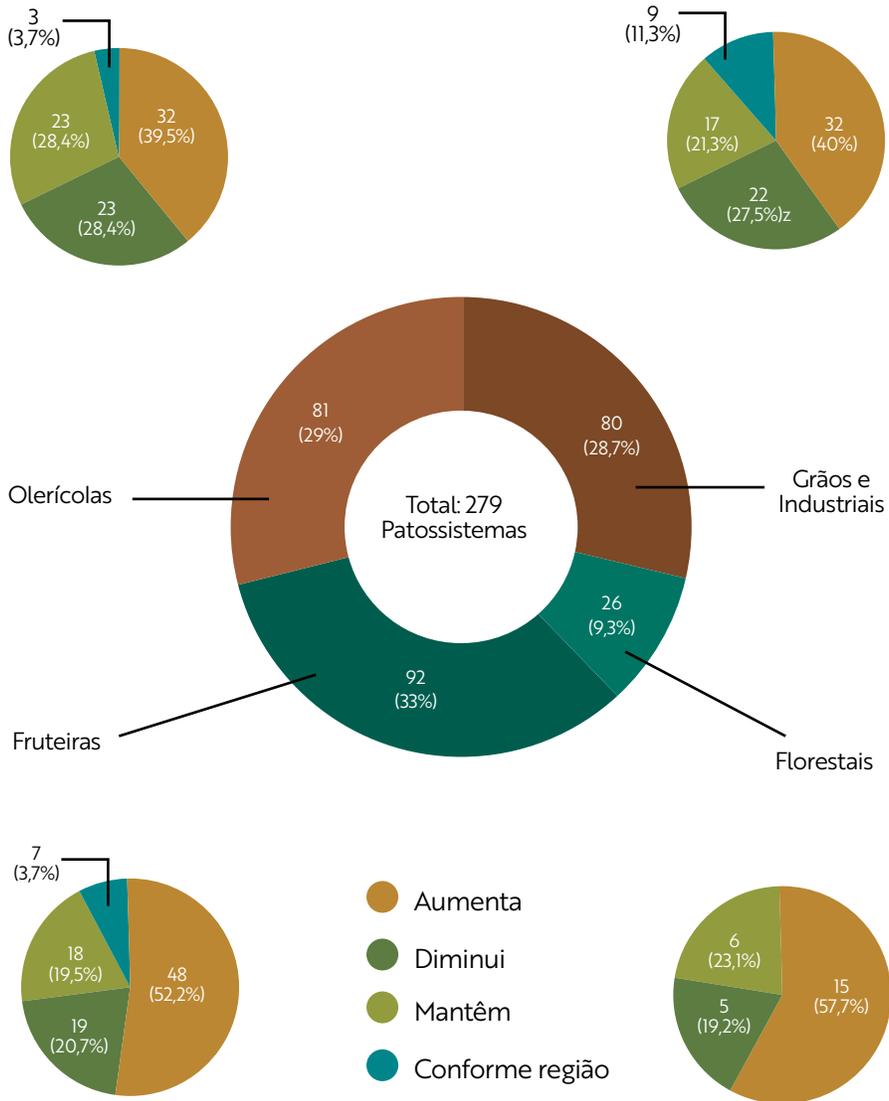


**Figura 23.3.** Temperatura média do ar (°C) nas estações do ano, agregados em verão (dezembro a fevereiro), outono (Março a Maio), inverno (Junho a Agosto) e primavera (Setembro a Novembro) para o clima observado de referência de 1961-1990 e o clima projetado de 2071-2100, cenários B1 e A2, da média de 15 modelos climáticos globais do Quarto Relatório do IPCC. Fonte: Hamada e Ghini (2015).

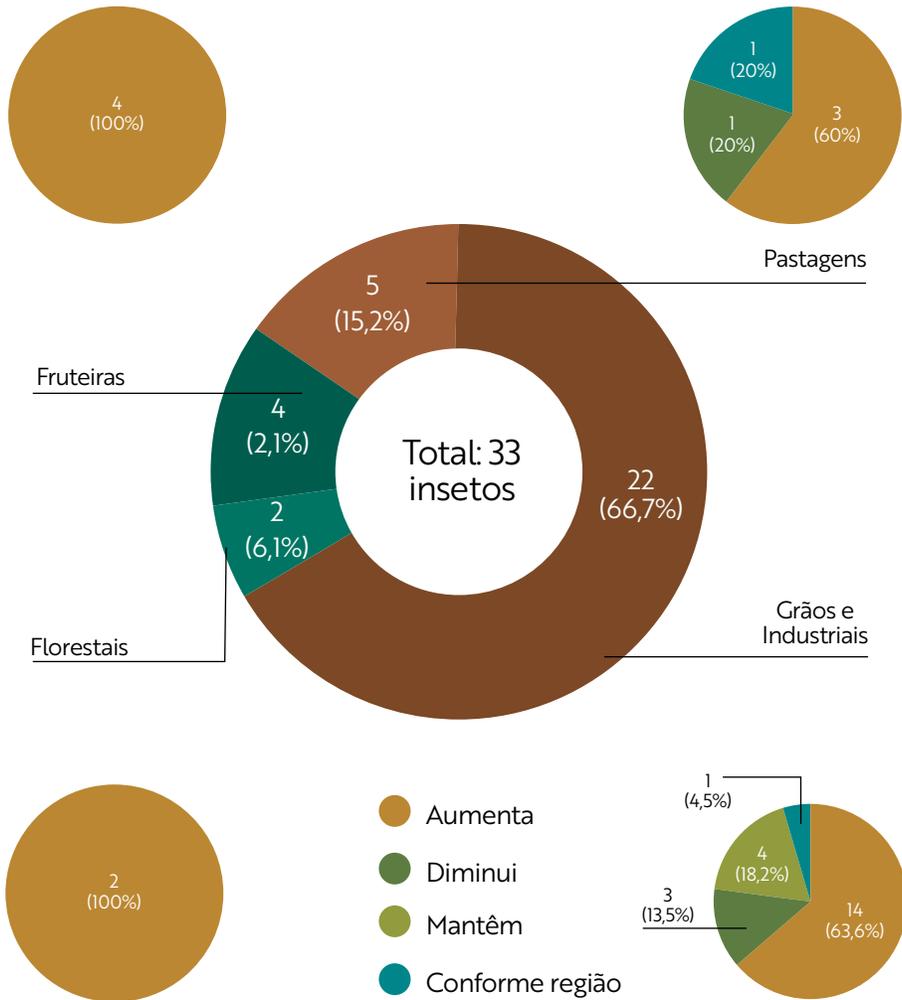
As projeções estão se tornando cada vez mais confiáveis graças ao desenvolvimento crescente dos modelos climáticos globais (IPCC, 2007). Entre 1990 e 2021, observações e modelos melhoraram a compreensão do clima (IPCC, 2021). Se na década de 1990 apontou-se um aquecimento global de 0,3 °C a 0,6 °C, desde os anos 1800, o Sexto Relatório (AR6) indica aquecimento de 0,95 °C a 1,2 °C. A evolução dos modelos também se deu na sua resolução espacial, cujas projeções partiram de 500 km e, mais recentemente, apresentam 100 km (modelos de sistema global) e de 25 a 50 km (modelos de sistema regional), considerados modelos de alta resolução. Além disso, os modelos atuais adicionaram elementos da química de atmosfera, uso e cobertura do solo, biogeoquímica terrestre e oceânica, e interações de aerossol e nuvem aos elementos que já vinham sendo considerados de circulação atmosférica e oceânica, transferência radioativa, física terrestre e gelo marinho.

## DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA E TEMPORAL DE DOENÇAS E PRAGAS

O impacto das mudanças climáticas foi analisado em 279 patossistemas de 30 culturas agrícolas (Figura 23.4), e 33 insetos-pragas de oito culturas (Figura 23.5 e Tabela 23.2), considerando as publicações realizadas (Ghini et al., 2007; Ghini et al., 2008; Ghini; Hamada, 2008; Ghini et al., 2011a; Ghini et al., 2011b; Hamada et al., 2011b; Hamada et al., 2015; Angelotti et al., 2014; Angelotti et al., 2017; Bettiol et al., 2017). Para as doenças de plantas, os cultivos analisados foram divididos em quatro grupos: Fruteiras (abacaxi, banana, caju, citros, coco, frutas de caroço, mamão, manga, melão, morango e uva); Olerícolas (alface, batata, brássicas, cebola, pimentão e tomate); Grãos e Industriais (amendoim, arroz, café, cana-de-açúcar, cereais, mandioca, milho, soja e sorgo); e Florestais (acácia, eucalipto, pinus e seringueira). Destaca-se que 127 patossistemas poderão ter um aumento da sua importância frente aos cenários futuros, e 69 patógenos poderão ter a importância diminuída. Esses dados por grupo de cultivos correspondem a um aumento de 52,2%, 39,5%, 40,0% e 56,7% para Fruteiras, Olerícolas, Grãos e Industriais, e Florestais, respectivamente, indicando que haverá uma maior favorabilidade climática para a ocorrência dos patógenos analisados (Figura 23.4). Para a ocorrência de insetos pragas, o aumento da favorabilidade climática será para 66% dos organismos estudados (Tabela 23.2), nas plantas agrupadas em Florestais (eucaliptos e mogno), Fruteiras (coco e pêssego), Pastagens, e Grãos e Industriais (algodão, café e oleaginosas) (Figura 23.5).



**Figura 23.4.** Potencial impacto das mudanças climáticas em doenças de plantas agrupadas em Fruteiras, Olerícolas, Grãos e Industriais, e Florestais, ocasionadas por fungos, bactérias, vírus e nematoides no Brasil.



**Figura 23.5.** Potencial impacto das mudanças climáticas em insetos-pragas em plantas agrupadas em Florestais, Fruteiras, Pastagens, e Grãos e Industriais no Brasil.

Tanto o aumento, quanto a redução na ocorrência de risco de problemas fitossanitários são informações importantes para defesa vegetal, uma vez que alterações na dinâmica populacional de microrganismos e insetos têm implicações diretas nas estratégias de manejo e nos custos de produção.

Destaca-se que a ocorrência de problemas fitossanitários interfere diretamente na dinâmica florestal, causando impactos sobre o crescimento, a reprodução e a sobrevivência das espécies (Dukes et al., 2009). Entretanto, analisando os resultados obtidos ao longo dos últimos anos no Brasil, apenas 9% dos estudos foram realizados em patossistemas florestais, e apenas um estudo com praga em mogno, sendo essa uma lacuna importante para novos estudos.

Os resultados obtidos por meio do uso do SIG com a elaboração de mapas de distribuição geográfica e temporal têm contribuído na geração de conhecimento sobre a favorabilidade climática em diferentes áreas, com climas específicos. Para o Brasil, um país continental, as informações geradas em função do clima das regiões produtoras têm sido fundamentais para a análise de dados de doenças associadas às localizações geográficas. Por exemplo, Angelotti et al. (2017a) avaliaram o potencial impacto das mudanças climáticas na ocorrência do míldio da videira, causado por *Plasmopara viticola*, no Brasil, conjugando dados experimentais de efeitos do aumento de temperatura e mapas de distribuição geográfica e temporal da favorabilidade de ocorrência da doença. No estudo foram consideradas a temperatura do ar e a duração de período de molhamento foliar do clima de referência e climas futuros. Os autores observaram que a infecção do míldio da videira será afetada pelo aumento da temperatura, diminuindo a severidade e aumentando o período latente da doença. Assim, com base nos cenários climáticos futuros projetados pelo IPCC, os mapas indicam, em geral, redução da favorabilidade de ocorrência do míldio no território brasileiro, mas com variabilidade para as diferentes regiões produtoras de uva.

A distribuição espacial e os riscos frente à favorabilidade climática a partir dos mapas elaborados considerando as projeções do clima futuro contribuirão para a prevenção e a disseminação de patógenos entre as diferentes regiões (Bisonard et al., 2020). Doenças como o cancro bacteriano da videira podem ser evitadas em função do conhecimento sobre o risco climático das regiões produtoras, especificado por meio de mapas de distribuição geográfica e temporal, que podem ser facilmente interpretados (Angelotti et al., 2017b). A partir da análise potencial de risco, os tomadores de decisão podem, além de prevenir a entrada de um patógeno, recomendar medidas de controle mais eficientes.

Para prever a distribuição geográfica do ácaro vermelho das palmeiras, Raiolla indica (Acari: Tenuipalpidae), praga invasora do coqueiro no Brasil, Navia et al. (2016) utilizaram a metodologia na construção de mapas considerando faixas de favorabilidade de temperatura e umidade relativa. Os níveis dessas faixas foram definidos a

partir da informação disponível sobre a biologia e a dinâmica populacional da praga. Os autores observaram aumento de favorabilidade para os cenários futuros, indicando agravamento do impacto da praga, caso esta esteja amplamente disseminada e causando danos no país. Também verificaram que, nos cenários de referência e futuros de mudanças climáticas, a maior parte das áreas favoráveis e muito favoráveis para o ácaro-vermelho-das-palmeiras está no Nordeste do Brasil.

A partir das projeções de aumento, redução ou manutenção na ocorrência de problemas fitossanitários, faz-se necessário o acompanhamento das populações ao longo dos anos, visto que outros fatores, como os efeitos diretos e indiretos dos elementos climáticos sobre as plantas hospedeiras, a ocorrência de inimigos naturais, bem como a adaptação dos microrganismos e dos insetos, podem interferir nas projeções. Além disso, as mudanças climáticas poderão causar impactos sobre a geografia dos cultivos agrícolas, com perspectivas de ampliação de áreas de cultivos em regiões de clima temperado. Desta maneira, maior atenção precisará ser dada à distribuição geografia e temporal de pragas e doenças de plantas, com possível interferência nos quadros fitossanitários atual e futuro.

**Tabela 23.2.** Efeito das mudanças climáticas na ocorrência de insetos-pragas no Brasil.

Hospedeiro	Praga	Efeito das mudanças climáticas
Algodão (Albuquerque et al., 2017)	Curruquerê-do-algodoeiro ( <i>Alabama argillacea</i> )	Aumento populacional
	Ácaro vermelho ( <i>Tetranychus luteidii</i> )	Aumento da favorabilidade com diferença ao longo dos meses
Café (Ghini et al., 2008)	Bicho-mineiro ( <i>Leucoptera coffeella</i> )	Aumento populacional
Coco (Marçal et al., 2013; Navia et al., 2016)	Ácaro-vermelho-das-palmeiras ( <i>Raoiella indica</i> )	Aumento da favorabilidade
Eucalipto (Wrege et al., 2017)	Percevejo-bronzeado ( <i>Thaumastocoris peregrinus</i> )	Aumento populacional
Mogno (Wrege; Thomazini, 2017)	Broca do ponteiro ou broca das meliáceas ( <i>Hypsipyla grandella</i> )	Aumento populacional
Oleaginosas (Bueno et al., 2017)	Curculionídeos-das-raízes ( <i>Parapanatomorus fluctuosus</i> )	Aumento populacional
	Lagarta ( <i>Elasmopalpus lignosellus</i> )	Tolerante ao aquecimento global
	Lagarta ( <i>Agrotis ipsilon</i> ); <i>Maraca vitrata</i> )	Baixo impacto frente ao aumento da temperatura
	Coco ( <i>Anticarsia gemmatalis</i> )	Temperatura > 25 °C poderá prejudicar o desenvolvimento e/ou deslocar a área de ocorrência desta praga para outras regiões
	Lagarta-da-soja ( <i>Anticarsia gemmatalis</i> )	Aumento na região Sul
	Lagartas falsa-medideiras ( <i>Complexo de Plusiinae</i> )	Resposta variável em função das regiões produtoras
	Lagartas (gênero Spodoptera) e Lagartas-das-maças ( <i>Chloridea virescens</i> )	Aumento
	Lagarta ( <i>Helicoverpa armigera</i> )	Redução
	Traça-das-crucíferas ( <i>Plutella xylostella</i> )	Adaptação em regiões com altas temperaturas
	Mosca branca ( <i>Bemisia tabaci</i> )	Aumento
	Váquinha ( <i>Ceratomya arcuata</i> ; <i>Diatrocha speciosa</i> )	Elevação da temperatura até 30 °C é benéfica à ocorrência desses insetos
	Trips ( <i>Frankliniella</i> sp.; <i>Caliothrips brasiliensis</i> )	Aumento
	Ácaro ( <i>Tetranychus urticae</i> ; <i>Polyphagotarsonemus latus</i> )	Aumento
	Percevejo-verde ( <i>Nezara viridula</i> )	Redução
	Percevejo-marrom ( <i>Euschistus heros</i> )	Aumento de áreas favoráveis
	Percevejo-verde-pequeno ( <i>Piezodorus guildinii</i> )	Manutenção das áreas favoráveis nas regiões quentes e frias do Brasil.
Pastagens (Auaud et al., 2017)	Cigarrinha ( <i>Mahanarva spectabilis</i> )	Oeste; Aumento incremento na região Sul
	Pulgão ( <i>Siphia flava</i> , <i>Rhopalosiphum padi</i> )	Redução de <i>Siphia flava</i> e aumento para <i>Rhopalosiphum padi</i>
	Lagarta ( <i>Spodoptera frugiperda</i> )	Aumento no número de gerações
	Cochonilha ( <i>Antonina graminis</i> )	Aumento da taxa metabólica do inseto e no número de gerações
Pêssego (Nava et al., 2017)	Mosca-das- frutas ( <i>Anastrepha fraterculus</i> , <i>Ceratitis capitata</i> e <i>Grapholita molesta</i> )	Aumentov

## EXEMPLOS DE POSSÍVEIS IMPACTOS DA ALTERAÇÃO AMBIENTAL

Grande parte das olerícolas de importância econômica tem seu centro de origem em locais de climas temperado e foram introduzidas no Brasil por imigrantes europeus e asiáticos que tinham hábitos de consumo desses vegetais em seus países de origem. Durante décadas esses vegetais foram selecionados por produtores e pesquisadores visando torná-los cada vez mais adaptados às condições de clima e solo do ambiente tropical. Essa insistência proporcionou estabilidade anual de produção, evitando sazonalidades na oferta dos produtos. Couve-flor e brócolis, alfaces crespas e americanas são encontradas em grande parte do Brasil durante o ano todo. Além da seleção para adaptabilidade ambiental, os programas de melhoramento genético também têm agregado resistência a importantes patógenos. Para que essa resistência funcione, é necessário compreender a dinâmica da população patogênica e sua interação com o ambiente e com o hospedeiro. Alterações ambientais podem reduzir a expressão dos genes de resistência, tornando suscetíveis genótipos antes resistentes. Isso acontece, por exemplo, com o gene Mi-1 do tomateiro, responsável pela resistência aos nematoides *Meloidogyne javanica*, *Meloidogyne incognita* e *Meloidogyne arenaria*, amplamente utilizado nos programas de melhoramento da cultura. A temperatura ambiente acima de 28 °C torna esse gene não efetivo e os genótipos suscetíveis (Dro-pkin, 1969). Portanto, a elevação térmica por período prolongado fará com que a efetividade da resistência seja perdida e o problema com a doença volte a ser importante (Brunelli et al., 2017).

Mudança no ambiente também pode favorecer a infecção e colonização de patógenos. *Leveillula taurica*, agente causal do oídio em pimentão, por exemplo, é altamente favorecido por elevadas temperaturas e baixa umidade relativa. No Brasil, em um passado recente, essa doença era importante em plantas de pimentões cultivadas em ambiente protegido e irrigadas por sistema de gotejamento. Hoje, em vista da redução do regime pluviométrico que algumas regiões enfrentam, essa doença também se tornou importante para pimentão cultivado em campo aberto. Não são raros relatos de epidemia dessa doença, tanto em campo aberto quanto em cultivo protegido. A elevação térmica e a alteração no regime pluviométrico estão associadas a essas epidemias. Kobori et al. (2008) haviam predito o aumento significativo na importância dessa doença diante de mudanças climáticas.

Frente a um novo cenário climático, patógenos e vetores também podem sofrer pressão de seleção, mantendo sua importância ou até mesmo aumentando. Vários patógenos e pragas possuem plasticidade genotípica, o que pode lhes garantir sucesso de sobrevivência em ambientes que antes seriam inóspitos. *Podosphaera xanthii*, causador do oídio das cucurbitáceas, é um exemplo. Essa espécie possui mais de 28 raças fisioló-

gicas descritas (Hong, 2018), que são capazes de suportar ampla faixa de temperatura e umidade. Como seus esporos são dispersos a grandes distâncias, os patótipos selecionados em um local podem migrar rapidamente para outros distantes do local de origem. Ao chegarem nesse novo ambiente, podem se tornar predominantes, ampliando o problema da doença. Exemplo disso é a raça 3.5, originalmente descrita na Europa em 2008 (Pitra; Besombes, 2008). Três anos após esse primeiro relato, ela foi encontrada nos Estados Unidos (McCreight; Coffey, 2011), e, mais recentemente, no Brasil. Essa é uma raça capaz de infectar as cucurbitáceas em ampla faixa de temperatura e de umidade relativa, e tem a tendência de se tornar predominante após introduzida, causando importantes epidemias. Na região de Baraúnas (RN), onde foi detectada pela primeira vez no Brasil, a temperatura pode chegar facilmente aos 38 °C, e a umidade relativa pode variar de 50% a 90%, dependendo da época do ano. Brunelli et al. (2008) projetaram possível substituição de raças com manutenção da importância da doença frente a novos cenários climáticos. Por ter sido encontrada recentemente no Brasil, não há dados suficientes para afirmar se a raça 3.5 é atualmente a predominante.

Outro exemplo importante é o oomiceto *Bremia lactucae*, agente causal do míldio da alface. Esse patógeno causa problemas em locais ou épocas com temperatura baixa, entre 15 °C e 20 °C, e com alta umidade relativa. O que se tem observado ao longo dos últimos anos, principalmente nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, é que a doença, antes restrita aos meses de inverno, está estendendo a importância para a primavera. Novos isolados estão sendo identificados no Brasil, e parte deles é capaz de quebrar os genes de resistência de muitas variedades comerciais. Apesar de baixa plasticidade climática, *Bremia* parece estar se adaptando a ambientes um pouco mais aquecidos. Não se espera, até o ponto em que se conhece desse patógeno, que ele passe a ter importância em temperaturas muito elevadas, assim como previsto por Kobori et al. (2011), mas o que se observa é que, mesmo em ambientes um pouco mais aquecidos, a doença continua importante.

Patógenos de solo também podem evoluir para continuar parasitando seus hospedeiros quando submetidos à pressão de seleção. *Plasmodiophora brassicae*, um importante patógeno das plantas da família das brássicas, como brócolis, couve-flor, repolho e rúcula, tem mostrado ampla adaptação às alterações ambientais e químicas do solo. Dados de literatura indicam que a infecção do patógeno nas raízes das plantas é altamente favorecida por ambiente ácido do solo, associado a temperatura ambiente entre 20 °C e 25 °C (Carrijo; Rêgo, 2000; Maringoni, 2005). Observações a campo, entretanto, contrapõem a essa afirmação. Nos campos brasileiros não é raro ataque severo de *Plasmodiophora brassicae* em temperaturas superiores a 25 °C, demonstrando claramente que a adaptação desse patógeno já o tornou capaz de suportar ambientes aquecidos. Em cultivos extensivos do Equador, brócolis são atacados severamente por *Plasmodiophora brassicae* em pH do solo acima de 8,0. Até o momento, não se co-

nhecem, na espécie *Brassica oleracea*, genes de resistência efetivos e duráveis a este patógeno. Com a falta de base genética para resistência, aliada à ampla adaptação ambiental, maior até do que a do próprio hospedeiro, este é um exemplo de patógeno que pode ampliar a importância diante de um cenário de mudança climática, assim como predito por Brunelli et al. (2011).

O mosaico dourado do tomateiro ou geminivirose é uma das doenças virais mais importantes para o cultivo de tomate ao redor do mundo. No Brasil, é causada por mais de 14 espécies distintas de vírus pertencentes ao gênero *Begomovirus*. Essas espécies possuem genoma formado por DNA de fita simples e circular, podendo ser compostos por uma única partícula (monopartido) ou por duas (bipartido). No país, apenas um *begomovirus* monopartido foi reportado (ToMoLCV), todos os demais são bipartidos (Inoue-Nagata et al., 2016).

A transmissão se dá de forma persistente pela mosca branca *Bemisia tabaci*. O biótipo B (MEAM 1) de *Bemisia tabaci* foi o grande responsável pelas severas epidemias ocorridas nas últimas décadas no Brasil. Em 2014, foi reportado pela primeira vez a ocorrência do biótipo Q (MED) de *Bemisia tabaci* (Barbosa et al., 2014). Este biótipo tem menor valor de competição quando comparado ao B, porém possui alto nível de resistência aos neonicotinóides, inseticidas muito utilizados para controle de mosca branca. Talvez por este motivo, nos levantamentos populacionais mais recentes feitos no Brasil, o biótipo Q tem se mostrado prevalente nas principais áreas hortícolas brasileiras. Nos últimos dois anos, houve redução significativa na incidência e severidade do mosaico dourado nas principais áreas de cultivo de tomate do Brasil. Esse fato coincide com a redução na população do biótipo B e incremento do Q. Gottlieb et al. (2010) já haviam reportado, em estudos realizados em Israel, que o biótipo Q, transmitia de forma errática e pobre o TYLCV, um geminivírus monopartido, para plantas de tomate. Provavelmente bactérias simbiotes, presentes no biótipo B e ausentes no biótipo Q, em Israel, seriam a causa da baixa habilidade deste último em transmitir o *begomovirus*. A redução na importância da doença no Brasil pode, aos moldes do ocorrido em Israel, estar associada à troca da população do inseto vetor. Isso demonstra que alterações não esperadas na população de vetores e pragas podem alterar as previsões realizadas sobre importância futura das doenças. Nas análises preditivas realizadas por Gioria et al. (2008) sobre alterações climáticas e doenças do tomateiro, esperava-se que, com o aumento da temperatura, o geminivírus continuasse a ter a importância do passado, uma vez que populações de mosca branca tendem a se multiplicar mais facilmente em um cenário mais aquecido. De fato, o inseto continua a ter grande importância como praga, mas pode ter perdido a importância como vetor. Apesar dessa redução na importância da doença, vivenciada nos últimos anos, técnicos e melhoristas que trabalham com a cultura do tomateiro não esperam que este cenário perdure por muito tempo. Exatamente por haver uma ampla diversidade ge-

nética na população do biótipo Q, é esperado que em algum momento a doença volte a ter a importância de alguns anos atrás. Por isso, os programas de melhoramento do tomateiro continuam o trabalho de ampliar o *pool* de genes de resistência a estes vírus nas novas variedades comerciais.

## EXPERIÊNCIAS DA PARCERIA COM INSTITUIÇÃO DE PESQUISA DA ARGENTINA

Uma aliança estratégica entre a Embrapa Meio Ambiente e o Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) da Argentina, por meio do projeto Climafitos (2011–2015) e Climafitos 2 (2018–2021), possibilitou a realização de análises conjuntas de doenças, enfatizando a importância da internacionalização da pesquisa, abrindo novas oportunidades para explorar o risco de surgimento de outros problemas fitossanitários que poderiam afetar os diferentes países, inclusive na região da América do Sul (Bisonard et al., 2020). Nesse estudo foram analisadas doenças que afetam a cultura da cana-de-açúcar e do amendoim no Brasil e na Argentina. Um caso analisado foi a queima das folhas da cana-de-açúcar, causada por *Stagonospora sacchari*. No Brasil, este agente fitossanitário é considerado uma Praga Quarentenária A1, o que significa que é uma espécie exótica potencial (não introduzida) e que constitui ameaça à economia agrícola, sendo necessárias medidas de controle que evitem a entrada no país. Na Argentina foi relatada, mas não é considerada um dos principais patógenos da cultura. O patógeno pode gerar perdas de produção quando as condições climáticas forem favoráveis e as variedades cultivadas suscetíveis. A intensidade da doença é incrementada na presença de chuvas intensas no verão, que podem acelerar a disseminação do patógeno (Lee; Liang, 2000). As principais áreas de cana-de-açúcar na Argentina apresentam-se favoráveis ou muito favoráveis à doença, e nos períodos futuros o panorama é de aumento da favorabilidade à sua incidência, diferentemente do que ocorre nas áreas produtoras de amendoim no Brasil, onde a tendência de favorabilidade climática apresenta redução no futuro (Hamada et al., 2019).

Na cana-de-açúcar, a ferrugem alaranjada causada pelo fungo *Puccinia kuehnii* é a doença mais nova da cultura nas Américas. Restrita à Austrália e ao Sudeste Asiático como doença secundária, tornou-se importante desde a detecção na Flórida (EUA), em 2007 (Comstock et al., 2008). Logo, o patógeno foi registrado em diferentes países, entre eles o Brasil (Barbasso et al., 2010) e a Argentina (Funes et al., 2016). Na Argentina, o registro foi em uma pequena área canavieira da província de Misiones, próxima à fronteira com o Brasil, e até o momento não foi registrada a presença nas províncias de Tucumán, Salta e Jujuy, principal área produtora Argentina (Funes et al., 2016). No Brasil, o patógeno ganhou importância econômica devido aos danos causados nas

principais regiões produtoras do estado de São Paulo (Klosowski et al., 2015; Sentelhas et al. 2016). A ocorrência está intimamente relacionada às condições ambientais favoráveis para as etapas do ciclo de infecção do patógeno e à presença de cultivares suscetíveis. O desenvolvimento da ferrugem alaranjada é favorecido por períodos prolongados com temperaturas noturnas entre 20 °C e 22,2 °C. No entanto, temperaturas máximas acima de 32,2 °C afetam negativamente o desenvolvimento da doença (Sangel et al., 2019). Avaliando o risco de ocorrência da ferrugem alaranjada na Argentina e no Brasil frente às mudanças climáticas, determinou-se que a favorabilidade para a ocorrência nas principais regiões produtoras de cana-de-açúcar variou ao longo dos meses do ciclo de cultivo. Tanto para a Argentina quanto para Brasil, os cenários climáticos futuros apontam para uma redução da favorabilidade para a ocorrência da ferrugem alaranjada da cana-de-açúcar nos meses de maior crescimento da cultura (dezembro a março).

Nos países Brasil e Argentina, produtores de amendoim, a ocorrência de condições climáticas favoráveis, com umidade relativa igual ou superior a 90% e temperaturas médias acima de 20 °C, apresenta-se como uma ameaça à produção devido à ocorrência de doenças, principalmente a mancha castanha e a mancha preta, causadas pelos fungos *Cercospora arachidicola* e *Cercosporidium personatum*, respectivamente. Essas doenças têm ocorrência frequente, com maior ou menor intensidade dependendo das condições ambientais, em ambas as regiões produtoras (Barreto, 2016; March et al., 1993). Os mapas de distribuição geográfica e temporal da mancha preta do amendoim para a Argentina e Brasil apresentam diferenças na favorabilidade ao longo dos meses e dos anos. No clima atual, as principais áreas produtoras de amendoim da Argentina apresentam alta favorabilidade para a ocorrência da mancha preta, e os cenários futuros indicam aumento na favorabilidade climática. No entanto, para o Brasil, as mesorregiões de Ribeirão Preto, Araraquara Bauru, Assis e Marília, que ainda apresentam áreas desfavoráveis para ocorrência do fungo *Cercosporidium personatum*, no futuro enfrentarão aumento da favorabilidade, com destaque para o mês de março, que apresenta, na atualidade, 85% da área desfavorável. Estas diferenças podem ser explicadas pela interação planta-patógeno-ambiente, relacionadas com a adaptabilidade dos patógenos aos diferentes locais de produção, e pela diversidade genética das variedades de amendoim plantadas nos dois países (Bisonard et al., 2020).

## CONTRIBUIÇÕES E EFEITOS SOBRE ESTRATÉGIAS DE MANEJO

É indiscutível a importância de realizar uma previsão, a mais detalhada possível, utilizando as informações constantes nos relatórios do IPCC. Essas previsões permitem que profissionais que trabalham no setor definam novas estratégias de manejo das doenças sob a ótica das alterações climáticas. Esse aspecto sempre foi

discutido no âmbito do projeto Climapest, motivo do envolvimento de profissionais das empresas privadas que trabalham diretamente com o manejo integrado. Todas as medidas de controle disponíveis devem ser consideradas nas estratégias de manejo. Entretanto, considerando os cenários das mudanças climáticas e as informações obtidas de que a importância de diversas doenças das principais culturas agrícolas brasileiras será aumentada, novas estratégias devem ser desenvolvidas e outras, já disponíveis, encaradas com novas abordagens. Assim, a associação do controle genético (o mais importante e menos impactante no controle de doenças), químico, físico, biológico e cultural terá extrema importância no enfrentamento das mudanças climáticas.

Os métodos de controle de doenças de plantas poderão ser afetados pelas mudanças climáticas. Assim, o entendimento desses efeitos colaborará na redução das perdas de produtividade, sendo ferramenta indispensável para permitir uma previsão com determinada segurança. Cada componente do novo clima influenciará de diferentes formas no manejo integrado. O aumento da temperatura poderá fazer com que importantes genes de resistência sejam desligados, e, com isso, variedades atualmente resistentes poderão perder essa característica. Ainda, o aumento de temperatura poderá inviabilizar a utilização de determinados agentes de controle biológico mais sensíveis ao aumento da temperatura.

Alterações na precipitação, relacionadas com intensidade, frequência ou duração, poderão comprometer a eficiência tanto do controle químico quanto do biológico, haja vista que ambos dependem dessas condições para manter a eficiência ou mesmo a presença sobre o hospedeiro.

Além dos efeitos diretos sobre o clima (temperatura e umidade), os novos cenários preveem alteração no ciclo do carbono. O aumento da concentração de  $\text{CO}_2$  atmosférico interferirá direta e indiretamente sobre o controle biológico e químico. No caso do controle biológico, as populações envolvidas poderão ser afetadas negativamente, positivamente ou não sofrerem nenhum tipo de ação pelo aumento do  $\text{CO}_2$ . O controle químico poderá ser influenciado negativamente nas plantas que responderem positivamente ao incremento do  $\text{CO}_2$  (aumento de crescimento e vigor) pela dificuldade dos produtos em atingir o alvo. Além disso, a fisiologia e a morfologia das plantas também serão alteradas, e com isso aspectos relacionados a alguns mecanismos de resistência poderão ser comprometidos. É conhecido que a elevação na concentração de  $\text{CO}_2$  atmosférico altera as concentrações de nutrientes e de carboidratos nas plantas, a quantidade de fibras, o acúmulo de silício (importante na resistência de algumas plantas), a quantidade de estômatos nas folhas, o acúmulo de cera nas folhas, e outras alterações, todas guardando relação com a incidência e severidade de doenças. Assim, considerar também esse fator nas previsões seria importante. Contudo, não existem informações disponíveis até o momento.

O aumento nos níveis de CO<sub>2</sub> e de temperatura e alterações no padrão de precipitação, por exemplo, bem como a nova geografia das doenças prevista em Ghini e Hamada (2008), Ghini et al. (2011a) e Bettiol et al. (2017), sugerem que o controle cultural por meio da rotação de cultura precisará ser reestruturado, pois as plantas utilizadas nessa prática poderão ter sua resistência aos patógenos alterada, além de poderem ser atacadas por novos problemas fitossanitários. Dessa forma, haverá necessidade de ampliar os estudos sobre quais sequências de rotação deverão ser recomendadas.

Quando se analisa os cenários futuros, apresentado em Ghini e Hamada (2008), Ghini et al. (2011a) e Bettiol et al. (2017), observa-se que o controle físico, de modo geral, deverá ser pouco influenciado pelas mudanças climáticas, pois o uso de refrigeração, atmosfera controlada ou modificada, radiação, eliminação de determinados comprimentos de ondas, termoterapia dos órgãos de propagação, e tratamento térmico do solo por meio do uso de vapor, da solarização e de coletor solar, são menos dependentes das condições climáticas do que os outros métodos. A refrigeração, o uso de radiação, a termoterapia de órgãos de propagação, a eliminação de determinados comprimentos de ondas e o tratamento térmico do solo utilizam energia externa ao sistema, e normalmente são empregados com controle das condições ambientais. A solarização do solo e o uso de coletor solar poderão ser beneficiados pelo aumento de temperatura em todas as regiões brasileiras. Contudo, dependendo do que ocorrer, com a precipitação poderão ser negativamente influenciados em determinados períodos do ano.

A desinfestação anaeróbica ou biológica dos solos é um método de tratamento de solo que visa ao controle de doenças das plantas causados por patógenos habitantes do solo (Roskopf et al., 2015; Shrestha et al., 2016), que vem aumentando de importância nos últimos anos, nos esforços de substituir o uso de brometo de metila, um dos gases responsáveis pela destruição da camada de ozônio. Essa prática poderá ser beneficiada pela elevação da temperatura e do aumento do CO<sub>2</sub>. Considerando que a desinfestação anaeróbica é obtida por meio da incorporação de fontes de matéria orgânica, ricas em carbono, associada à cobertura do solo com um filme plástico para elevação da temperatura (Roskopf et al., 2015), as alterações ambientais previstas deverão acelerar a atividade microbiana no solo, aumentando a eficiência da técnica. Assim como a solarização, essa é uma ferramenta de controle que tem sido pouco utilizada, mas poderá ser estimulada frente a um novo cenário climático.

Por outro lado, o controle biológico de doenças de plantas, que é o resultado de uma interação entre hospedeiro, patógeno e uma variedade de não patógenos que repousam no sítio de infecção, com potencial de limitar ou aumentar a atividade dos patógenos, ou a resistência do hospedeiro (Cook; Baker, 1983; Cook, 1985), é amplamente afetado pelas condições ambientais. Portanto, seguramente as mudanças climáticas previstas em Ghini e Hamada (2008), Ghini et al. (2011a) e Bettiol et al. (2017), alterarão as interações hospedeiro-patógeno-agentes de controle biológico (Bettiol, 2008). De

acordo com Bettiol e Ghini (2009), as mudanças climáticas afetarão o número de espécies e a diversidade de microrganismos que vivem na rizosfera, filosfera, carposfera e espermosfera, e dos endofíticos, e conseqüentemente o equilíbrio biológico necessário nesse ambiente. Além disso, de acordo com Coakley et al. (1999), as mudanças climáticas alterarão a dinâmica da comunidade microbiana do solo e da parte aérea das plantas, com isso poderão interferir no controle de patógenos e no desenvolvimento delas. Dessa forma, os quatro tipos de controle biológico (natural, conservativo, aumentativo e clássico) poderão ser amplamente influenciados no clima futuro. O controle biológico natural poderá ser o mais afetado, pois é importante o equilíbrio das populações. O controle biológico conservativo, que tem a indução de supressividade do solo como um grande exemplo, terá que ser estudado de forma a considerar as mudanças climáticas, pois o recrutamento de microrganismos pelas plantas será alterado (Faria et al., 2021). O controle biológico clássico, baseado na introdução de espécies exóticas, terá que considerar as novas condições climáticas e se os organismos introduzidos se adaptarão aos novos cenários. No caso do controle biológico aumentativo, em que a eficácia dos agentes de controle biológico varia de acordo com o ambiente (Bettiol; Ghini, 2009; Elad; Pertot, 2014), seguramente será afetada em todas as regiões brasileiras considerando as previsões em Ghini e Hamada (2008), Ghini et al. (2011a) e Bettiol et al. (2017). Assim, os efeitos do ambiente sobre os bioagentes obrigatoriamente terão que ser amplamente estudados antes de seu registro, para o controle de doenças. Contudo, ainda é muito limitado o conhecimento sobre os efeitos das mudanças climáticas sobre os agentes de biocontrole. Mas, com certeza, durante o processo de desenvolvimento dos produtos biológicos, como no isolamento e na seleção dos agentes de biocontrole, os aspectos relacionados com as mudanças climáticas deverão ser considerados (Bettiol et al., 2021, no prelo). As informações constantes em Ghini e Hamada (2008), Ghini et al. (2011a), Bettiol et al. (2017) e Hamada et al. (2011a, 2013) podem colaborar para que, durante o processo de desenvolvimento dos produtos, os novos cenários sejam utilizados.

Nesse aspecto, e considerando as elevações de temperatura previstas no Terceiro (TAR) e no Quarto (AR4) Relatórios do IPCC e apresentados em Ghini e Hamada (2008) e Ghini et al. (2011a), respectivamente, pode-se afirmar que tanto a diversidade quanto as atividades dos antagonistas serão alteradas. Bactérias do gênero *Bacillus* estão entre os antagonistas mais comercializados no mundo para controle de doenças de plantas. Essas bactérias, apesar de serem afetadas, se desenvolvem em uma ampla faixa de temperatura. *Bacillus*, portanto, possivelmente não teria sérios problemas com as elevações de temperatura. Dentre os fungos antagonistas mais comercializados no mundo, sem dúvida *Trichoderma* é o mais importante. Dentro do gênero *Trichoderma*, é possível encontrar isolados que crescem e se reproduzem em ampla faixa de temperatura. Dessa forma, será imprescindível isolar e selecionar isolados adaptados

aos novos cenários climáticos, principalmente se considerado o seu uso em áreas em que a temperatura já é mais elevada, como diversas regiões brasileiras. Contudo, antagonistas como *Conyothirium* e *Clonostachys*, que são mais sensíveis à temperatura, poderão ter a eficiência alterada, pois a faixa adequada de temperatura para esses fungos está entre 15 °C e 25 °C (Sutton et al., 1997; Melo, 1998; Morandi et al., 2001; Zaldúa; Sanfuentes, 2010; Musiet-Soto, 2015).

De acordo com Bettiol (2008), considerado o mapa de temperaturas médias previstas para o Brasil por Hamada et al. (2008), a introdução massal de bioagentes deverá ser beneficiada nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, pois as temperaturas adequadas aos antagonistas se manterão por maior período. Entretanto, Bettiol (2008) considera que, para as regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, diversos antagonistas comercializados atualmente não encontrarão temperaturas adequadas para uso. Essas previsões são importantes de serem consideradas pelas instituições públicas e privadas nos trabalhos de isolamento e seleção de antagonistas, a fim de se obter organismos adaptados às novas condições climáticas. Além da temperatura, a precipitação também é fundamental para as atividades dos antagonistas, portanto também terão que ser consideradas as condições de umidade nos trabalhos de seleção destes.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Doença pode ser conceituada como uma interação dinâmica entre um patógeno agressivo e um hospedeiro suscetível, em íntima relação com o ambiente, o conhecido triângulo da doença. Uma das formas de controlar enfermidades de plantas é exatamente alterar o ambiente para desfavorecer a evolução de uma doença. Quando controlada, é possível prever as implicações da mudança no manejo. Um inseto passa a ser considerado como praga quando a sua população aumenta, causando dano econômico para uma cultura agrícola cultivada ou produtos armazenados. Noris et al. (2003) propõem um tetraedro, com o inseto, a cultura, o ambiente e o tempo em cada vértice.

As mudanças nos padrões climáticos da terra tendem a ser mais complexas, e as interferências sobre os hospedeiros, patógenos e insetos pragas não tão óbvias. Modelos matemáticos que tentam prever a nova realidade climática nos próximos 60 anos foram gerados a partir de relatórios disponibilizados pelo IPCC. Com base nesses dados, e com a experiência de cientistas e técnicos, foi possível prever possíveis novos padrões para as principais doenças e pragas que afligem culturas de importância econômica no Brasil. Essas previsões são fundamentais para nortear novas formas de controlar a doença. Entretanto, por envolver muitas variáveis, como adaptação do hospedeiro, adaptação do patógeno, interação desses novos genótipos entre si e no ambiente, é adequado que o monitoramento da doença seja sempre feito com olhar

crítico frente a novos cenários, permitindo seguir os rumos previamente determinados ou guiná-los, caso necessário.

A junção de cientistas e técnicos de vários setores do agronegócio permite um olhar mais amplo sobre os problemas que poderão advir das alterações climáticas. As previsões sobre os patossistemas frente aos novos cenários foram feitas a partir de parcerias com diversas instituições de pesquisa, universidades, fundações e empresas privadas. Os resultados contribuirão para o direcionamento do melhoramento genético, na busca de cultivares com maior tolerância aos estresses bióticos e alterações nas estratégias de manejo, auxiliando na escolha de medidas de adaptação que ajudarão a reduzir os impactos negativos frente às mudanças climáticas. Os mapas de distribuição geográfica e temporal apresentam também um papel importante na prevenção de disseminação entre fronteiras de países, uma vez que, a partir da identificação de potenciais ameaças, ações efetivas para a defesa vegetal poderão ser adotadas. Além disso, por meio do alerta do IPCC vislumbra-se que a proteção de plantas deverá trazer à luz as estratégias de manejo integrado, visando à conservação ambiental e à sustentabilidade dos sistemas de cultivo.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, F. A. de; HAMADA, E.; SANTOS, J. O. dos. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre a distribuição geográfica do curuquerê e do ácaro-vermelho-do algodoeiro nas regiões Nordeste e Centro-Oeste e no Estado do Tocantins. In: BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A. M.; GHINI, R. (Ed.). **Aquecimento global e problemas fitossanitários**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. cap. 17, p. 410-439. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/171030/1/Impacto-potencial-das-mudancas-climaticas-sobre-a-distribuicao-geografica.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2021.
- ANGELOTTI, F.; HAMADA, E.; GHINI, R.; GARRIDO, L. R.; TEIXEIRA, A. H. C.; PEDRO JUNIOR, M. J. **Mudanças climáticas e o cenário de ocorrência do mildio e do oídio da videira no Submédio do Vale do São Francisco**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2014. 20 p. (Embrapa Semiárido. Documentos, 260). Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/114743/1/SDC260.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2021.
- ANGELOTTI, F.; HAMADA, E.; MAGALHAES, E. E.; GHINI, R.; GARRIDO, L. R.; PEDRO JUNIOR, M. J. Climate change and the occurrence of downy mildew in Brazilian grapevines. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 426-434, 2017a. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000600006>.
- ANGELOTTI, F.; HAMADA, E.; PEIXOTO, A. R.; GARRIDO, L. R. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre a distribuição geográfica do cancro-bacteriano da videira no Brasil. BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A. M.; GHINI, R. (Ed.). **Aquecimento global e problemas fitossanitários**. Brasília, DF: Embrapa, 2017b. cap. 12, p. 243-261. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/165562/1/Fran-4.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2021.
- AUAD, A. M.; FONSECA, M. das G.; RESENDE, T. T. de. Efeito do aquecimento global sobre pragas das pastagens. In: BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A. M.; GHINI, R. (Ed.). **Aquecimento global e problemas fitossanitários**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. cap. 16, p. 380-409. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/174533/1/Cap-16-Livro-Aquecimento-Global.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2021.
- BARBOSA, L. F.; MARUBAYASHI, J. M.; MARCHI, B. R.; YUKI, V. A.; PAVAN, M. A.; MORIONES, E.; NAVAS-CASTILLO, J.; KRAUSE-SAKATE, R. Indigenous American species of the *Bemisia tabaci* complex are still widespread in the Americas. **Pest Management Science**, v. 70, n. 10, p. 1440-1445, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.3731>.
- BARRETO, M. Doenças do amendoim. In: AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L. E. A. (Ed.). **Manual de fitopatologia: doenças das plantas cultivadas**. 5 ed. Ouro Fino: Agronômica Ceres, 2016. v. 2. p. 75- 81.
- BISONARD, E. M.; ANGELOTTI, F.; HAMADA, E.; GONCALVES, R. R. V.; RAGO, A. M. Evolução da mancha preta do amendoim nas principais regiões produtoras da Argentina e do Brasil frente às mudanças no clima. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, p. 1778-1791, 2020. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.4.p1778-1791>.
- BUENO, A. de F.; BORTOLOTTI, O. C.; BUENO, R. C. O. de F.; HAMADA, E.; FAVETTI, B. M.; SILVA, G. V. Efeitos do aquecimento global sobre pragas de oleaginosas. In: BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A. M.; GHINI, R. (Ed.). **Aquecimento global e**

- problemas fitossanitários.** Brasília, DF: Embrapa, 2017. cap. 14, p. 280-347. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/165635/1/Efeitos-do-aquecimento.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2021.
- BETTIOL, W. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre o controle biológico de doenças de plantas. In: GHINI, R.; HAMADA, E. (Ed.). **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. cap. 18, p. 299-321. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/150056/1/2008CL-40.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2021.
- BETTIOL, W.; GHINI, R. Impactos das mudanças climáticas sobre o controle biológico de doenças de plantas. In: BETTIOL, W.; MORANDI, M.A.B. **Biocontrole de doenças de plantas: uso e perspectivas.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2009. p. 29-48. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/144210/1/2009CL-01.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2021.
- BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A. M.; GHINI, R. (Ed.). **Aquecimento global e problemas fitossanitários.** Brasília, DF: Embrapa, 2017. 488 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/165241/1/2017LVo3.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2021.
- BRUNELLI, K. R.; GIORIA, R.; KOBORI, R. F. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças das brássicas no Brasil. In: GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. (Ed.). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. p. 145-160. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/45857/4/24343.PDF>. Acesso em: 25 ago. 2021.
- BRUNELLI, K. R.; GIORIA, R.; KOBORI, R. F. Influência do aquecimento global na quebra de resistência genética a doenças de hortaliças. In: BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A. M.; GHINI, R. (Ed.). **Aquecimento global e problemas fitossanitários.** Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 159-176.
- BRUNELLI, K. R.; KOBORI, R. F.; GIORIA, R. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças do melão no Brasil. In: GHINI, R.; HAMADA, E. (Ed.). **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008, p. 129-139.
- CARRIJO, I. V.; RÊGO, A. M. Doenças das brássicas. In: ZAMBOLIM, L.; VALE, F. X. R.; COSTA, H. (Ed.). **Controle de doenças de plantas.** Viçosa: UFV, 2000, v. 1, p. 335-372.
- COAKLEY, S. M.; SCHERM, H.; CHAKRABORTY, S. Climate change and plant disease management. **Annual Review of Phytopathology.** v. 37, p. 399-426, 1999.
- COMSTOCK, J. C.; SOOD, S. G.; GLYNN, N. C.; SHINEII, J.; MCKEMY, J. M.; CASTLEBURY, L. A. First report of *Puccinia kuehnii* butler, causal agent of orange rust of sugarcane in the United States and Western Hemisphere. **Plant Disease,** v. 92, p. 175, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1094/PDIS-92-1-0175A>.
- DROPKIN, V.H. Necrotic reaction of tomatoes and other hosts resistant to *Meloidogyne*: Reversal by temperature. **Phytopathology,** v.59, p. 1632-1637, 1969. Disponível em: <https://eurekamag.com/research/014/757/014757499.php>. Acesso em: 25 ago. 2021.
- DUKES, J. S.; PONTIUS, J.; ORWIG, D.; GARNAS, J. R.; RODGERS, V. L.; BRAZEE, N.; COOKE, B.; THEOHARIDES, K. A.; STANGE, E. E.; HARRINGTON, R.; EHRENFELD, J.; GUREVITCH, J.; LERDAU, M.; STINSON, K.; WICK, R.; AYRES, M. Responses of insect pests, pathogens, and invasive plant species to climate change in the forests of northeastern North America: what can we predict? **Canadian Journal of Forest Research,** v. 39, p. 231-248, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1139/Xo8-171>.

FARIA, M. R.; COSTA, L. S. A. S.; CHIARAMONTE, J. B.; BETTIOL, W.; MENDES, R. The rhizosphere microbiome: functions, dynamics, and role in plant protection. **Tropical Plant Pathology**, v. 46, p. 13-25, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40858-020-00390-5>.

GASSMANN, W.; APPEL, H. M.; OLIVER, M. J. The interface between abiotic and biotic stress responses. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, p. 2023-2024, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erw110>.

GHINI, R. **Mudanças climáticas globais e doenças de plantas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2005. 104 p. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/58499/1/MudancasClimaticas2005.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2021.

GHINI, R.; BETTIOL, W.; HAMADA, E. Diseases in tropical and plantation crops as affected by climate changes: current knowledge and perspectives. **Plant Pathology**, v. 60, p. 122-132, 2011c. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02403.x>.

GHINI, R.; HAMADA, E. (Ed.). **Climate change: impacts on plant diseases in Brazil**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. E-book. Disponível em: <https://vendasliv.sct.embrapa.br/liv4/consultaProduto.do?metodo=detalhar&codigoProduto=00052830>. Acesso em: 25 ago. 2021.

GHINI, R.; HAMADA, E. (Ed.). **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 331 p. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/149956/1/2008OL-06.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2021.

GHINI, R.; HAMADA, E. (Org.). **Impactos das mudanças climáticas globais sobre problemas fitossanitários: descrição e resultados**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, 2013. 1 CD-ROM.

GHINI, R.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; COSTA, L. B.; BETTIOL, W. Research approaches, adaptation strategies, and knowledge gaps concerning the impacts of climate change on plant diseases. **Tropical Plant Pathology**, v. 37, n. 1, p. 5-24, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1982-56762012000100002>.

GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. Climate change and plant diseases. **Scientia Agricola**, v.65, special issue, p. 98-107, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000700015>.

GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. (Ed.). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011a. 356 p. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/45857/4/24343.PDF>. Acesso em: 25 ago. 2021.

GHINI, R.; HAMADA, E.; GONÇALVES, R. R. V.; GASPAROTTO, L.; PEREIRA, J. C. R. Análise de risco das mudanças climáticas globais sobre a sigatoka-negra da bananeira no Brasil. **Fitopatologia Brasileira**, v. 32, p. 197-204, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-41582007000300003>.

GHINI, R.; HAMADA, E.; PEDRO JUNIOR, M. J.; GONÇALVES, R. R. V. Incubation period of *Hemileia vastatrix* in coffee plants in Brazil simulated under climate change. **Summa Phytopathologica**, v. 37, p. 85-93, 2011b. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-54052011000200001>.

GHINI, R.; HAMADA, E.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; MARENGO, J. A.; GONÇALVES, R. R. V. Risk analysis of climate change on coffee nematodes and leaf miner in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 2, p. 187-194, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000200005>.

GOTTLIEB, Y.; ZCHORI-FEIN, E.; MOZES-DAUBE, N.; KONTSEDALOV, S.; SKALJAC, M.; BRUMIN, M.; SOBOL, I.; CZOSNEK, H.; VAVRE, F.; FLEURY, F.; GHANIM, M. The transmission efficiency of tomato yellow leaf curl virus by the whitefly *Bemisia tabaci* is correlated with the presence of a specific symbiotic bacterium species. *Journal of Virology*, v. 84, n. 18, p. 9310-9317, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1128/JVI.00423-10>.

HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; GARRIDO, L. R.; GHINI, R.; CARVALHO, M. C.; PALLADINO, R. P. Efeito das mudanças climáticas sobre a favorabilidade às podridões da uva madura e cinzenta da videira no Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 4, n. 6, p. 1213-1221, 2011b. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgfv4i6.232767>.

HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; GARRIDO, L.R.; GHINI, R. Cenários futuros de epidemia do oídio da videira com as mudanças climáticas para o Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 8, p. 454-470, 2015. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgfv8.o.p454-470>.

HAMADA, E.; BISONARD, E. M.; GONCALVES, R. R. V.; ANGELOTTI, F.; MORALES, C. C.; RAGO, A. M. Panorama da favorabilidade da doença queima das folhas da cana-de-açúcar no Brasil e na Argentina sob efeito das mudanças climáticas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 19, 2019, Santos. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2019. p. 775-778. Disponível em: <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/panorama-da-favorabilidade-da-doenca-queima-das-folhas-da-cana-de-acucar-no-brasil-e-na-argentina-sob-efeito-das-mudanca>. Acesso em: 25 ago. 2021.

HAMADA, E.; GHINI, R.; GONÇALVES, R. R. V. Efeito da mudança climática sobre problemas fitossanitários de plantas: metodologias de elaboração de mapas. *Engenharia ambiental*, v. 3, p. 73-85, 2006. Disponível em: <http://ferramentas.unipinhal.edu.br/engenhariaambiental/viewarticle.php?id=57&layout=abstract>. Acesso em: 09 ago. 2021.

HAMADA, E.; GHINI, R.; GONÇALVES, R. R. V.; MARENGO, J.; THOMAZ, M. C. **Atlas digital dos cenários climáticos futuros projetados para o Brasil com base no Terceiro Relatório do IPCC (2001):** variáveis de interesse agrícola. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2010. CD-ROM. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 82).

HAMADA, E.; GHINI, R.; MARENGO, J. A.; OLIVEIRA, B. S.; NOGUEIRA, S. M. C. **Atlas digital dos cenários climáticos projetados para o Brasil com base no Quarto Relatório do IPCC (2007):** variáveis de interesse agrícola. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2013. CD-ROM. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 96).

HAMADA, E.; GHINI, R.; MARENGO, J. A.; THOMAZ, M. C. Projeções de mudanças climáticas para o Brasil no final do século XXI. In: GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. (Ed.). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011a. p. 41-74.

HAMADA, E.; GHINI, R.; OLIVEIRA, B. S. Projeções de variáveis climáticas de interesse agrícola para o Brasil ao longo do século 21. In: BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A. M.; GHINI, R. (Ed.). **Aquecimento global e problemas fitossanitários.** Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 17-52.

HAMADA, E.; GONÇALVES, R. R. V.; MARENGO, J. A.; GHINI, R. Cenários climáticos futuros para o Brasil. In: GHINI, R.; HAMADA, E. (Ed.). **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 25-73. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/150054/1/2008CL-38.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2021.

HONG, Y.; HOSSAIN, M.R.; KIM H.; PARK, J.; NOU, S. Identification of two new races of *Podospaera xanthii* causing powdery mildew in melon in South Korea. **Plant Pathology Journal**, v. 34, n. 3, p. 182-190, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.12.2017.0261>.

HOUGHTON, J. T.; DING, Y.; GRIGGS, D. J.; NOGUER, M.; LINDEN, P. J. van der; DAI, X.; MASKELL, K.; JOHNSON, C. A. (Ed.). **Climate change 2001: the scientific basis: contribution of working group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 881 p. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/07/WG1\\_TAR\\_FM.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/07/WG1_TAR_FM.pdf). Acesso em: 25 ago. 2021.

IPCC. **Summary for policymakers: a contribution of Working Groups I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 20 p. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/07/WG1\\_TAR\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/07/WG1_TAR_SPM.pdf). Acesso em: 26 ago. 2021.

IPCC. Summary for policymakers. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (Ed.). **Climate change 2007: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. p. 1-18.

IPCC. Summary for policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇI, O.; YU, R.; ZHOU, B. (Ed.). **Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press. In Press. 2021. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGL\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGL_SPM.pdf). Acesso em: 25 ago. 2021.

IPPC Secretariat. **Scientific review of the impact of climate change on plant pests – A global challenge to prevent and mitigate plant pest risks in agriculture, forestry and ecosystems**. Rome. FAO on behalf of the IPPC Secretariat. 2021. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb4769en>.

KOBORI, R. F.; BRUNELLI, K. R.; GIORIA, R; Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças da alface no Brasil In: GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. (Eds.). **Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. p. 129-144. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/45857/4/24343.PDF>. Acesso em: 25 ago. 2021.

KOBORI, R. F.; GIORIA, R; BRUNELLI, K. R. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre as doenças do pimentão no Brasil. In: GHINI, R.; HAMADA, E. (Ed.). **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008, p. 119-128.

LEE, C. -S.; LIANG, Y. -G. Leaf scorch. In: ROTT, P.; BAILEY, R.; COMSTOCK, J. C.; CROFT, B.; SAUMTALLY, S. (Ed.). **A guide to sugarcane diseases**. Montpellier, France: CIRAD/ISSCT, 2000. p. 114-117.

MACQUEEN, A.; BERGELSON, J. Modulation of R-gene expression across environments. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, p. 2093-2105. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erv530>.

MARCH, G. J.; MARINELLI, A.; BEVIACQUA, J. E.; ALCALDE, M., Efecto de las temperaturas, humedad relativa y precipitaciones sobre el desarrollo de la viruela, causada por *Cercospora*

*arachidicola* Hori y *Cercosporidium personatum* (Berk. & Curt.) (Deighton) en maní (*Arachis hypogaea* L.) Boletín de Sanidad Vegetal Plagas, v.19, p. 227-235. 1993. Disponível em [https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf\\_plagas%2FBSVP-19-02-227-235.pdf](https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_plagas%2FBSVP-19-02-227-235.pdf). Acesso em: 25 ago. 2021.

MARINGONI, A. C. Doença das crucíferas (brócolis, couve, couve-chinesa, couve-flor, rabanete, repolho e rúcula). In: KIMATI, H.; AMORIN, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L. E. A. (Ed.). **Manual de fitopatologia: doenças das plantas cultivadas**. 4. ed. Campinas: Agronômica Ceres, v.2, 2005. p. 315-324.

McCREIGHT J. D.; COFFEY, M. D. Inheritance of resistance in melon PI 313970 to cucurbit powdery mildew incited by *Podosphaera xanthii* race S. *HortScience*, v. 46, p. 838-840, 2011. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.6.838>.

MELO, I. S. Agentes microbianos de controle de fungos fitopatogênicos. In: MELO, I. S.; AZEVEDO, J. L. (Ed.). **Controle biológico**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 1998. p. 17-68.

MORANDI, M. A. B.; MAFFIA, L. A.; SUTTON, J. C. Development of *Clonostachys rosea* and interaction with *Botrytis cinerea* in rose leaves and residues. *Phytoparasitica*, v. 29, p. 103-113, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02983954>.

MUSIET-SOTO, D. N. Eficacia de diferentes formulaciones de *Clonostachys rosea* en el control del moho gris (*Botrytis cinerea*) en condiciones operacionales de plantas de *Eucalyptus* spp. 2015. 62 f. Magister en Ciencias Forestales) - Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Chile, 2015. Versão eletrônica. Disponível em: [http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/1729/1/Tesis\\_Eficacia\\_de\\_diferentes\\_formulaciones.Image.Marked.pdf](http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/1729/1/Tesis_Eficacia_de_diferentes_formulaciones.Image.Marked.pdf). Acesso em: 09 ago. 2021.

MARÇAL, G. G.; HAMADA, E.; BENITO, N. P.; FERREIRA, M. N. D.; OLIVEIRA, T. C. Proposta metodológica para avaliação dos impactos das mudanças climáticas em pragas quarentenárias: estudo de caso em praga do coqueiro no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2013, Foz do Iguaçu. *Anais...* São José dos Campos: INPE. 7 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/86972/1/2013AA05.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2021.

NAVA, D. E.; WREGG, M. S.; DIEZ-RODRIGUEZ, G. I. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre a distribuição geográfica de insetos-praga na cultura do pessegueiro. In: BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A. M.; GHINI, R. (Ed.). **Aquecimento global e problemas fitossanitários**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. cap. 19, p. 453-476. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/165619/1/Dori-Nava-Livro-Aquecimento-global-e-problemas-fitossanitarios.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2021.

NAVIA, D.; HAMADA, E.; GONDIM JUNIOR, M. G. C.; BENITO, N. P. Spatial forecasting of red palm mite in Brazil under current and future climate change scenarios. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília v. 51, n. 5, p. 586-598, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000500020>.

PITRAT, M.; BESOMBES, D. Inheritance of *Podosphaera xanthii* resistance in melon line '90625' In: PITRAT, M. (Ed.). **Cucurbitaceae 2008: IXth EUCARPIA Meeting on Genetics and Breeding of Cucurbitaceae**. Avignon, France: INRA, 2008. p. 135-142. Disponível em: <https://powderymildew.ucr.edu/wp-content/uploads/2017/04/MPMA7.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2021.

RANDALL, D. A.; WOOD, R. A. (Coord.). Climate models and their evaluation. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (Ed.). **Climate change 2007: the physical science basis: contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. p. 589–662.

ROSSKOPF, E. N.; SERRANO-PÉREZ, P.; HONG, J.; SHRESTHA, U., RODRÍGUEZ-MOLINA, M. C.; MARTIN, K.; KOKALIS-BURELLE, N.; SHENNAN, C.; MURAMOTO, J.; BUTLER, D. Anaerobic soil disinfestation and soilborne pest management. In: MEGHVANSI, M. K.; VARMA, A. (Ed.). **Organic amendments and soil suppressiveness in plant disease management**. New York: Springer, 2015. p. 277-305. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-23075-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-23075-7_13).

SHRESTHA, U.; AUGÉ, R. M.; BUTLER, D. M. A Meta-analysis of the impact of anaerobic soil disinfestation on pest suppression and yield of horticultural crops. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, e1254, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01254>.

SUTTON, J. C.; LI, D. W.; PENG, G.; YU, H.; ZHANG, P.; VALDEBENITO-SANHUEZA, R. M. *Gliocladium roseum*, a versatile adversary of *Botrytis cinerea* in crops. **Plant Disease**, v. 81, p. 316–328, 1997. Disponível em: <https://apsjournals.apsnet.org/doi/pdf/10.1094/PDIS.1997.81.4.316>. Acesso em: 25 ago. 2021.

ZALDÚA, S.; SANFUENTES, E. Control of *Botrytis cinerea* in *Eucalyptus globulus* mini-cuttings using *Clonostachys* and *Trichoderma* strains. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 70, p. 576–582, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392010000400007>.

# MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PROBLEMAS FITOSSANITÁRIOS

*Kátia de Lima Nechet, Jeanne Scardini Marinho-Prado, Simone de Souza Prado, Eunice Reis Batista, Nilza Patrícia Ramos, Emília Hamada, Francislene Angelotti e Wagner Bettiol*

## INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas e suas consequências são um dos principais desafios a serem enfrentados pela humanidade. Os novos aspectos relacionados ao clima, como aumento de temperatura, aumento de gases de efeito estufa, eventos extremos, déficit hídrico, entre outros, afetam diferentemente todos os setores da sociedade, em todos os seus níveis, e a cada ano aumenta a vulnerabilidade do planeta às mudanças climáticas. O monitoramento dessas mudanças ao longo dos anos e os impactos observados e compilados em documentos de referência do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) antecipam os riscos a que estamos expostos e os futuros desafios que direcionam políticas de governo e estratégias para adaptação e mitigação desses efeitos (IPCC, 2021). A importância do tema se reflete em acordos internacionais, como o Acordo de Paris, realizado em 2016 e ratificado em 2020 por 189 países e a União Europeia, e no estabelecimento do enfrentamento às mudanças climáticas como um dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU) (Nações Unidas, 2020).

A produção agrícola contribui para as mudanças no clima do planeta por conta da emissão de gases de efeito estufa. Por outro lado, a agricultura é afetada, nos seus diversos componentes e ciclos, pelas mudanças climáticas. O estudo da relação entre variáveis climáticas e a produção agrícola é fundamental para identificar a vulnerabilidade dos sistemas de produção e propor estratégias de adaptação, visando garantir a oferta de alimentos nas mais diversas condições ambientais (Wing et al., 2021). Além do efeito na fisiologia das plantas, as mudanças climáticas influenciam de forma direta ou indireta a incidência de pragas, doenças e organismos benéficos, alterando a interação entre eles. O impacto nos sistemas produtivos varia de acordo com as especificações dos hospedeiros, organismos e das condições locais (Anderson et al., 2020). O conhecimento dessas alterações, através de experimentos, é um desafio para a ciência e é fundamental para a mitigação da redução de danos por problemas fitossanitários.

Os aumentos da concentração de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), da temperatura e da radiação ultravioleta UV-B estão entre os principais parâmetros climáticos estudados que influenciam a ocorrência e severidade de doenças e pragas de culturas importantes nas condições tropicais (Ghini et al., 2012). Embora na natureza esses fatores ocorram simultaneamente, o estudo em condições controladas é realizado de forma individualizada para garantir o controle experimental exigido para comprovação da alteração ou não do efeito desses fatores sobre o organismo-alvo. O estudo dos parâmetros separadamente não invalida os resultados obtidos, mas é importante para direcionar estudos posteriores, visando refinar as respostas obtidas em longo prazo com os diversos fatores e direcionar tomadas de decisão baseadas nesse conjunto de resultados.

Um dos principais desafios nessas experimentações é a metodologia utilizada, que exige o desenvolvimento e a manutenção de uma instrumentação para simular o aumento desses parâmetros nas condições experimentais. Isto foi observado nos ensaios conduzidos na Embrapa Meio Ambiente com simulação de aumento de  $\text{CO}_2$ , baseados em rede de sensores sem fio, e nos ensaios de aumento de radiação UV-B estruturados em sistemas modulares e com interface de comunicação, cujo desafio foi primeiramente desenvolver instrumentação com material comercial para simulação em condições de campo. Para parâmetros como temperatura e déficit hídrico, a simulação experimental é facilitada por equipamentos já disponíveis e de pronto uso. Porém, em algumas situações, esses ensaios são restritos a condições controladas (Ghini et al., 2011).

A temática das mudanças climáticas e seus efeitos sobre doenças e pragas foi uma linha de pesquisa iniciada na Embrapa Meio Ambiente em 2002, cuja primeira publicação foi o livro *Mudanças climáticas globais e doenças de plantas* de Ghini (2005). Posteriormente, um segundo livro organizado por Ghini e Hamada (2008) apresentou uma discussão mais específica sobre o efeito das mudanças climáticas em doenças de culturas importantes para o país. Em 2009, o projeto Climapest, liderado pela Embrapa Meio Ambiente, foi iniciado. O Climapest contou com uma equipe multidisciplinar de 130 pesquisadores de diferentes instituições de pesquisa do país. Nesse projeto pioneiro, os efeitos dos parâmetros temperatura,  $\text{CO}_2$  e radiação UV-B foram investigados em várias culturas de importância econômica para a agricultura brasileira, considerando diversos problemas fitossanitários para café, cana-de-açúcar, soja, videira e milho, bem como a diversidade dos biomas nacionais (Workshop de Mudanças Climáticas e Problemas Fitossanitários, 2012).

A partir do Climapest, outros projetos específicos foram executados, entre eles o Climapest-FACE que permitiu a continuação dos estudos com aumento de  $\text{CO}_2$  em um experimento do tipo *free air carbon-dioxide enrichment* (FACE), o primeiro a ser instalado na América Latina e a estudar o impacto do aumento da concentração de  $\text{CO}_2$  na cultura do café no mundo. O FACE instalado na Embrapa Meio Ambiente atendeu

a vários aspectos importantes, ainda não contemplados na literatura científica, em relação aos problemas fitossanitários e interações multitróficas, com informações geradas por experimento de longa duração (acima de três anos contínuos) e em bioma tropical (Ghini et al., 2015).

Os projetos Climafitos e Climafitos-2 também surgiram a partir do Climapest e permitiram a internacionalização da pesquisa voltada ao tema, assim como a avaliação dos impactos das mudanças climáticas sobre doenças e pragas em cultivos de importância para a agroindústria da Argentina e do Brasil. Outro desdobramento importante a partir do Climapest foi a participação do Brasil no documento *Scientific review of the impact of climate change on plant pests: a global challenge to prevent and mitigate plant-pest risks in agriculture, forestry and ecosystems* do International Plant Protection Convention (IPPC) (IPPC Secretariat, 2021), visando ao fortalecimento das ações para a proteção de plantas, contribuindo para o aprimoramento das bases científicas, permitindo o planejamento de políticas fitossanitárias e auxiliando os formuladores de políticas públicas voltadas para a segurança alimentar.

Nesse capítulo serão apresentados os principais resultados obtidos pelos projetos liderados pela Embrapa Meio Ambiente e pelas unidades parceiras, bem como outras instituições públicas e privadas, relacionados aos efeitos dos aumentos da concentração de CO<sub>2</sub>, da temperatura e da radiação UV-B nos problemas fitossanitários.

## DIÓXIDO DE CARBONO

A concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> ([CO<sub>2</sub>]) aumentou em torno de 40% desde 1750 (280 para 400 ppm), e na última década (2002–2011) registrou-se o aumento mais rápido para o período ( $2,0 \pm 0,1$  ppm ano<sup>-1</sup>), atingindo-se 410 ppm em junho de 2021 (IPCC, 2021). As emissões cumulativas de CO<sub>2</sub> determinam em grande parte o aquecimento global no final do século XXI com projeções de aumento em torno de 1,5 °C na temperatura do planeta, alterações climáticas consideradas irreversíveis (IPCC, 2018). Além de ser um dos principais gases de efeito estufa, o CO<sub>2</sub> também pode causar impactos diretos nos agroecossistemas. Ainda, por ser um nutriente para as plantas, várias culturas têm sua produção aumentada em condições de aumento de CO<sub>2</sub> (Jablonski et al., 2002).

Para estudos que confirmem essas respostas são necessárias estruturas que simulem o aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, como aquelas empregadas na rede Climapest, cujos experimentos adotaram câmaras de crescimento, estufas de topo aberto (*open-top chambers* – OTCs), estufas de topo aberto modificadas (OTCs modificadas) e experimentos com emissão de CO<sub>2</sub> a céu aberto (*free air carbon-dioxide enrichment* – FACE). Ao longo dos anos, avanços metodológicos propuseram equipamentos que permitem a realização de experimentos em condições naturais sem a limitação de manutenção das plantas em vasos, utilizando OTCs, OTCs modificadas e FACE (Torre-Neto; Ghini, 2011).

Em condições controladas, o uso de câmaras climáticas tipo Fitotron permite a simulação do aumento da  $[CO_2]$ , associado ao fotoperíodo, à umidade e à temperatura, simulando diferentes condições ambientais, inclusive a interação dos elementos climáticos (Figura 24.1). Este tipo de estrutura apresenta-se como uma importante ferramenta para estudos empíricos e tem contribuído para elucidar a influência da temperatura e de outros elementos climáticos no desenvolvimento de epidemias e de infestações (Araújo et al., 2019, Ferreira et al., 2013; Gullino et al., 2017). Para doenças de plantas, a interação aumento da  $[CO_2]$  × temperatura, simulada em câmaras de crescimento, apontou redução na severidade do oídio do meloeiro e aumento do período de incubação do patógeno (Araújo et al., 2019).

Foto: Simone Souza Prado

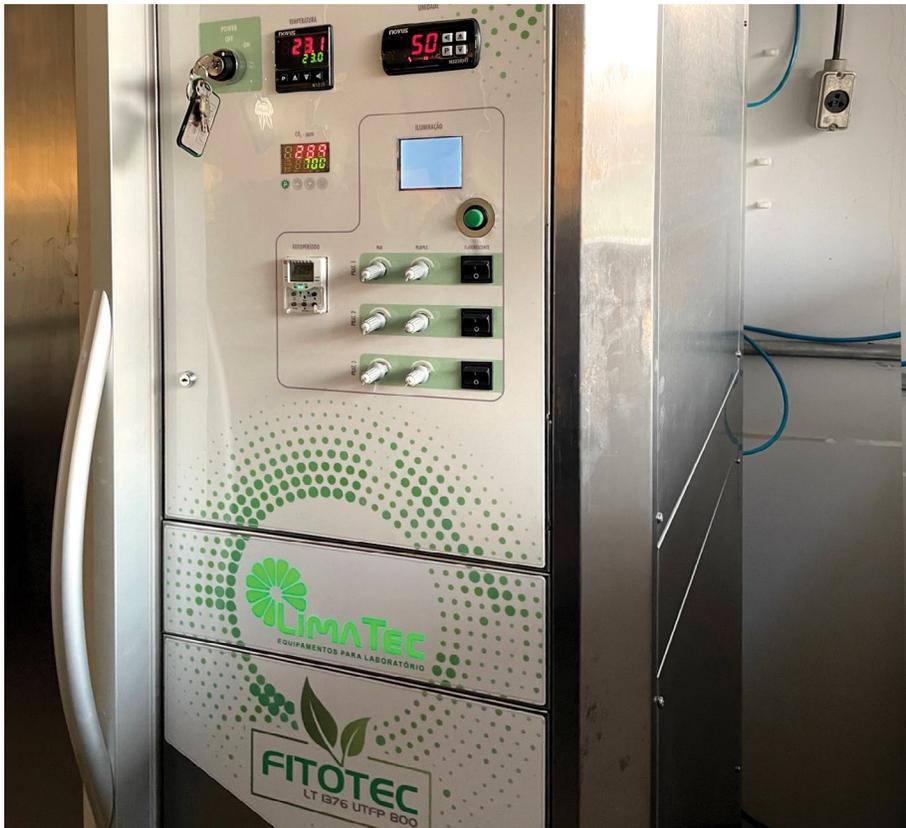


Figura 24.1. Câmara climática tipo Fitotron instalada na Embrapa Meio Ambiente.

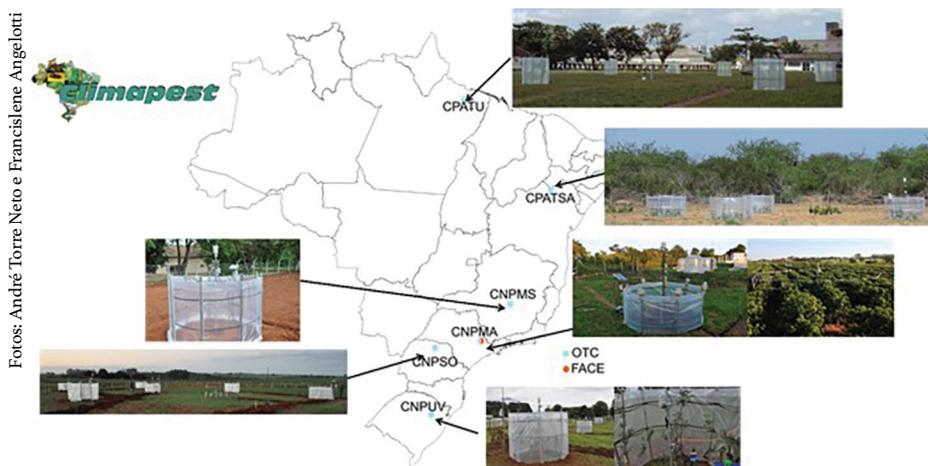
Para gramíneas forrageiras, Ferreira et al. (2013), verificaram que o aumento da  $[CO_2]$  manterá o nível de suscetibilidade e resistência de diferentes espécies à *Mahanarva spectabilis* (cigarrinha-das-pastagens). Estudos em plantas de melão verificaram que essa condição prolonga a duração dos estágios imaturos de *Liriomyza sativae* (mosca minadora), não tendo impacto na sua viabilidade e na sobrevivência dos adultos (Santos et al., 2020). As alterações na  $[CO_2]$  podem influenciar diferentes aspectos biológicos de insetos herbívoros, incluindo o tempo de desenvolvimento, sobrevivência, longevidade, fecundidade e, conseqüentemente, a dinâmica populacional (Auad; Fonseca, 2017).

Alterações na fisiologia da planta hospedeira também afetam o comportamento de insetos herbívoros e predadores (Fonseca et al., 2014). Dorneles Junior e Prado (2015) observaram, em câmaras climáticas tipo Fitotron, que plantas de soja apresentaram maiores teores de assimilação líquida de  $CO_2$ , de condutância estomática, eficiência do uso de água, área foliar, número de trifólios e de total de vagens (61% maior) quando submetidas ao aumento da  $[CO_2]$  (800 ppm). Nessas condições, a soja acelerou seu ciclo fisiológico em 8%, alcançando mais rapidamente os estádios fenológicos na fase vegetativa e reprodutiva, e o desenvolvimento ninfal de *Euschistus heros* (percevejo-marrom) aumentou (Miranda et al., 2015; Dorneles Junior, 2017). Os insetos levaram mais tempo para atingir a maturidade e o peso de machos e fêmeas acasaladas foi maior; no entanto a produção de ovos, a longevidade e a taxa de aumento da população foram reduzidas (Dorneles Junior et al., 2015a; Dorneles Junior et al., 2015b). Em ambos os tratamentos foi observada uma baixa infectividade natural dos insetos com o simbionte primário de *E. heros* e a proporção de insetos positivos foi maior no ambiente com aumento de  $[CO_2]$  (Costa et al., 2018; Prado, 2012).

As estufas de topo aberto foram desenvolvidas para avaliar o impacto do aumento da  $[CO_2]$  sobre problemas fitossanitários, permitindo o plantio direto no solo e o acompanhamento de todos os estádios de desenvolvimento das plantas com menor interferência de artefatos. As OTCs tradicionais foram criadas originalmente em países de clima temperado. No entanto, com sua utilização em experimentos em regiões tropicais foram observadas temperaturas e umidades maiores no seu interior que as do ambiente, o que pode ocasionar alterações no comportamento das plantas e dos problemas fitossanitários. Lessin e Ghini (2009), em experimento realizado em Jaguariúna, SP, concluíram que o plástico das OTCs pode interferir na radiação solar e na temperatura no interior das parcelas.

Por esse motivo, no projeto Climapest, um novo modelo foi desenvolvido, denominado de OTCs modificadas, que permitem avaliar os impactos do aumento da concentração de  $CO_2$  sem comprometer as demais variáveis do microclima em seu interior e permitir a realização dos ensaios em regiões de clima quente. No projeto

Climapest foram construídas seis instalações com estufas de topo aberto adaptadas, montadas nas principais regiões produtoras do País: Vacaria, RS (Embrapa Uva e Vinho), Londrina, PR (Embrapa Soja), Sete Lagoas, MG (Embrapa Milho e Sorgo), Petrolina, PE (Embrapa Semiárido), Belém, PA (Embrapa Amazônia Oriental), e Jaguariúna, SP (Embrapa Meio Ambiente) (Figura 24.2).



**Figura 24.2.** Localização das seis instalações com estufas de topo aberto modificadas, montadas nas principais regiões produtoras do país: Embrapa Uva e Vinho, em Vacaria, RS, Embrapa Soja, em Londrina, PR, Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG, Embrapa Semiárido, em Petrolina, PE), Embrapa Amazônia Oriental, em Belém, PA e Embrapa Meio Ambiente, em Jaguariúna, SP).

Os estudos em OTCs e OTCs modificadas apontaram que as respostas frente ao aumento da  $[CO_2]$  variaram entre os diferentes patossistemas (Tabela 24.1). No caso das ferrugens do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) (Tozzi, Ghini, 2016), do eucalipto (*Puccinia psidii*) (Ghini et al., 2015) e da soja (*Phakopsora pachyrhizi*) (Lessin; Ghini, 2011) ocorreu redução dessas ferrugens com o aumento da  $[CO_2]$ . Em contrapartida, esse ambiente promoveu aumento na severidade da ferrugem da alfafa (*Uromyces striatus*) (Santos, 2015) e da ferrugem da videira (*Phakopsora euvitis*) (Fernandes et al., 2012).

A especificidade da resposta de diferentes cultivares de plantas ao aumento da  $[CO_2]$  foi observada para o arroz (Gória et al., 2013), o cafeeiro (Tozzi; Ghini, 2016) e a videira (Angelotti, 2011). Isso reforça a importância de estudos que considerem as especificidades de cada patossistema, levando em consideração a variabilidade genética das cultivares, uma vez que a ocorrência de doenças em plantas é um processo complexo.

Além da avaliação do impacto sobre a ocorrência de doenças de plantas, nas OTCs modificadas foram avaliados os impactos na comunidade de nematoides de vida livre em amostras de solo. Castro et al. (2011) observaram aumento populacional com o aumento da [CO<sub>2</sub>]. Este resultado confirma a complexidade destes estudos, uma vez que alterações no solo, como a decomposição de matéria orgânica e outras atividades, causam impacto na simbiose dos microrganismos do solo.

**Tabela 24.1.** Resultados de estudos conduzidos em diferentes estruturas utilizadas para simular o impacto do aumento da concentração atmosférica de dióxido de carbono ([CO<sub>2</sub>]) em problemas fitossanitários, obtidos a partir da rede Climapest.

Hospedeiro	Problema fitossanitário	Estrutura utilizada para simular o aumento da [CO <sub>2</sub> ]	Efeito observado do aumento da [CO <sub>2</sub> ]	Referência
Alfafa ( <i>Medicago sativa</i> )	<i>Uromyces striatus</i> (ferrugem)	Estufa de topo aberto modificada	Aumento da severidade e crescimento das plantas	Santos e Ghini, (2014), Santos (2015)
	<i>Fusarium oxysporum</i> (murcha de Fusarium)	Estufa de topo aberto modificada	Redução na severidade	Santos (2015)
Arroz ( <i>Oryza sativa</i> )	<i>Magnaporthe oryzae</i> (brusone)	Estufa de topo aberto	Aumento da severidade	Gória et al. (2014)
	<i>Pyricularia grisea</i> (brusone)	Estufa de topo aberto	Não alterou a incidência de fungos em sementes de arroz	Gória et al. (2012)
Café ( <i>Coffea arabica</i> )	<i>Hemileia vastatrix</i> (ferrugem)	Estufa de topo aberto	Redução na severidade	Tozzi e Ghini (2016)
	<i>Cylindrocladium candelabrum</i> (mancha foliar)	Estufa de topo aberto	Redução na incidência e severidade	Silva e Ghini (2014), Ghini et al. (2015)
Eucalipto ( <i>Eucalyptus</i> sp.)	<i>Puccinia psidii</i> (ferrugem)	Estufa de topo aberto	Redução na severidade e maior crescimento das plantas	Ghini et al. (2014), (2015)
	<i>Ceratocystis fimbriata</i> (murcha-de-Ceratocystis)	Estufa de topo aberto	Redução na severidade e maior crescimento das plantas	Santos et al. (2013), Ghini et al. (2015)

Continua...

Tabela 24.1. Continuação

Hospedeiro	Problema fitossanitário	Estrutura utilizada para simular o aumento da [CO <sub>2</sub> ]	Efeito observado do aumento da [CO <sub>2</sub> ]	Referência
Feijão-caupi ( <i>Vigna unguiculata</i> )	<i>Oidium</i> sp. (oídio)	Estufa de topo aberto modificada	Redução na severidade	Santana et al. (2012)
FORAGEIRAS ( <i>Brachiaria</i> sp., <i>Pennisetum purpureum</i> )	<i>Mahanarva spectabilis</i> (cigarrinhas-pastagens)	Câmara de crescimento	Alteração no acúmulo de massa seca e não interferência na longevidade dos adultos	Ferreira et al. (2013)
Melão ( <i>Cucumis melo</i> )	<i>Oidium</i> sp. (oídio)	Câmara de crescimento	Redução na severidade e aumento do período de incubação	Araujo et al. (2019)
	<i>Liriomyza sativae</i> (mosca-minadora)	Câmara de crescimento	Prolongamento da duração dos estágios imaturos	Santos et al., (2020)
Soja ( <i>Glycine max</i> )	<i>Microsphaera diffusa</i> (oídio)	Estufa de topo aberto	Aumento na severidade	Lessin e Ghini (2009)
	<i>Phakopsora pachyrhizi</i> (ferrugem)	Estufa de topo aberto	Redução na severidade	Lessin e Ghini (2011)
Videira ( <i>Vitis vinifera</i> )	<i>Phakopsora euvtis</i> (ferrugem)	Estufa de topo aberto modificada	Aumento na severidade	Fernandes et al. (2012)
	<i>Plasmodium viticola</i> (míldio)	Estufa de topo aberto modificada	Não alterou a severidade	Pinheiro et al. (2012)
	<i>Oidium tuckeri</i> (oídio)	Estufa de topo aberto modificada	Aumento na severidade	Rodrigues et al (2012)
	<i>Xanthomonas campestris pv. viticola</i> (cancro bacteriano)	Câmara de crescimento	Resposta diferenciada entre as cultivares com redução da severidade	Conceição et al. (2017)

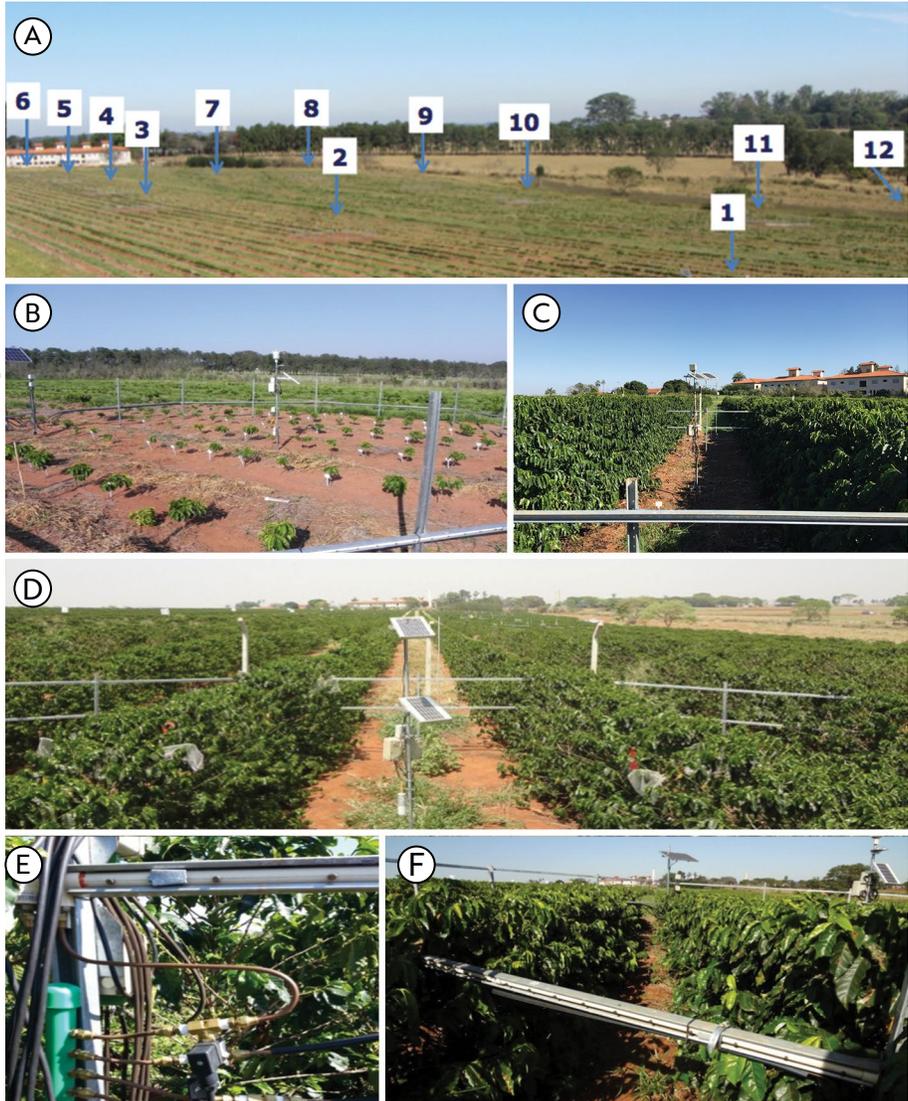
Experimentos do tipo FACE, que permitem a emissão de CO<sub>2</sub> a céu aberto, são considerados ideais, pois permitem eliminar artefatos e obter respostas em agroecossistemas ou sistemas naturais intactos. O principal fator limitante da utilização de experimentos FACE é o alto custo devido à sofisticada instrumentação e ao elevado consumo de CO<sub>2</sub>, na ordem de aproximadamente 1 t dia<sup>-1</sup>.

O Climapest-FACE foi instalado em área de aproximadamente 7 ha na Embrapa Meio Ambiente, em latossolo vermelho-amarelo de textura média. Doze anéis com 10 m de diâmetro foram construídos, espaçados por pelo menos 70 m, para evitar contaminação entre as parcelas (Figura 24.3A). A área total foi plantada com café Catuaí Vermelho IAC-144 e, após um ano, mudas de Catuaí Vermelho IAC-144 e da cultivar

Obatã foram plantadas dentro dos anéis (Figura 24.3B). Após três anos do início do experimento, a cultivar Obatã foi eliminada da área em função do reduzido espaço disponível para ambas as cultivares (Figura 24.3C). Em comparação com os projetos similares existentes, a implementação desenvolvida pela Embrapa Instrumentação no Climapest-FACE da Embrapa Meio Ambiente inovou com a utilização de instrumentação baseada em rede de sensores sem fio no padrão ZigBee e uso de baterias alimentadas por energia solar, que permitiram que as mudanças de concentração de CO<sub>2</sub> influenciadas pelo vento fossem rapidamente acompanhadas e sem atraso significativo (Figuras 24.3D, 24.3.E e 24.3F) (Torre-Neto; Ghini, 2011; Torre-Neto et al., 2011).

O experimento foi conduzido de forma intermitente no período de agosto de 2011 a junho de 2016. A liberação de CO<sub>2</sub> ocorreu até atingir a concentração de 200 ppm acima da concentração do ambiente no centro de seis anéis, enquanto os demais seis anéis testemunhas mantiveram a concentração ambiental de CO<sub>2</sub> registrada no momento. A performance do Climapest-FACE, de 2011 a 2015, variou de 44 a 60%, expressa pela frequência de valores em torno da concentração alvo ( $550 \pm 100 \mu\text{mol mol}^{-1}$ ), e teve influência do período do ano (Apêndice A).

Fotos: Raquel Ghimi (A,B); Kátia de Lima Nêchet (C, D, E, F)



**Figura 24.3.** Experimento Climapest-FACE instalado em uma área de 7 ha de café na Embrapa Meio Ambiente: vista geral mostrando a distribuição dos doze anéis (A); parcela em 2011, com linhas de plantio das cultivares Catuaí IAC-144 e Obatã (B); parcela em 2015 com linhas de plantio apenas da cultivar Catuaí IAC-144 (C); parcela experimental mostrando o painel solar no centro do anel (D); dispositivos para controle de fluxo e fumigação de  $\text{CO}_2$  (E); barras de injeção de  $\text{CO}_2$  do anel (F).

Os principais resultados obtidos no Climapest-FACE foram relacionados à fisiologia, morfologia, fitossanidade e interações multitróficas considerando diferentes períodos, cultivares e estádios fenológicos do cafeeiro (Tabela 24.2).

As plantas respondem diretamente ao aumento da  $[CO_2]$  pela elevação das taxas líquidas de fotossíntese ( $A$ ) e frequentemente pela redução na condutância estomática ( $g_s$ ) (Long et al., 2006). O aumento dos valores de  $A$  sob condições de aumento da  $[CO_2]$  nas plantas de fotossíntese  $C_3$  está associado ao estímulo da taxa de carboxilação e de redução da oxigenação da enzima RuBisCO e, conseqüentemente, à diminuição da fotorrespiração (Ainswort; Rogers, 2007). A fotossíntese do cafeeiro é intrinsecamente baixa sob as condições atmosféricas de  $CO_2$  atuais em função de limitações impostas à difusão do  $CO_2$  da atmosfera até o sítio de carboxilação no cloroplasto. Pela mesma razão, os valores de  $g_s$  também são baixos, portanto, espera-se que o cafeeiro seja altamente beneficiado pelo aumento da  $[CO_2]$  na ausência de restrições hídricas e de imposição ao crescimento das raízes (DaMatta et al., 2019).

De fato, o que foi observado ao longo de cinco anos do experimento Climapest-FACE é que os valores de  $A$  tendem a ser maiores sob aumento da  $[CO_2]$ , porém nem sempre foram significativamente maiores que os valores medidos da  $[CO_2]$  do ambiente, desde a fase jovem até a fase adulta dos cafeeiros (Ghini et al., 2015; DaMatta et al., 2016; Rakocevic et al., 2018; 2020; 2021). Nos dois primeiros anos do Climapest-FACE foi observado que as cultivares de café Catuaí e Obatã desenvolvidas em condições de aumento da  $[CO_2]$  mantiveram as taxas fotossintéticas e a eficiência no uso da água relativamente altas, sendo que houve aumento do crescimento (avaliado durante outubro de 2011 e janeiro de 2014) e produtividade das plantas. As produtividades das cultivares Catuaí e Obatã aumentaram em 14,6% e 12,0%, respectivamente, na colheita realizada entre julho e agosto de 2013. Também foi observado que o conteúdo de nitrogênio foliar foi 5,2% menor na cultivar Obatã, enquanto não foi observado efeito na cultivar Catuaí. Em avaliações realizadas nos anos de 2014 e 2015, Iost (2017) observou que a altura das plantas e o diâmetro do caule foram maiores nas plantas desenvolvidas em ambiente com aumento da  $[CO_2]$ .

As medições relacionadas à fotossíntese, realizadas no quarto e no quinto ano de cultivo da cultivar Catuaí IAC-144, em diferentes estratos horizontais das copas dos cafeeiros, épocas climáticas e fenológicas, possibilitaram verificar maior frequência de maiores valores de  $A$  sob aumento da  $[CO_2]$ , bem como maiores valores, ou mais frequentemente, nenhuma alteração dos valores de  $g_s$  em comparação com a  $[CO_2]$  do ambiente, especialmente nos estratos superiores, mais iluminados (Rakocevic et al, 2020; 2021). Como resultado dos frequentes aumentos das taxas de  $A$ , associados a poucas alterações nos valores de  $g_s$ , a eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ) foi frequentemente mais alta sob aumento da  $[CO_2]$  especialmente nas épocas secas, quando os valores de  $g_s$  costumam ser reduzidos em resposta às baixas temperaturas

e restrição hídrica no solo. Consequentemente, os valores de eficiência intrínseca do uso da água (iWUE) foram maiores nos cafeeiros adultos cultivados sob aumento da  $[CO_2]$ , resultando em menor depleção de água do solo e proporcionando melhor status hídrico dos cafeeiros, o que também pode ser verificado pela ocorrência frequente de altos valores de  $g_s$  e de transpiração nas épocas secas (Rakocevic et al, 2018; 2020; 2021). Não houve aclimação ou retrorregulação da fotossíntese dos cafeeiros em resposta ao aumento da  $[CO_2]$  em nenhum dos estádios de desenvolvimento ao longo dos cinco anos do experimento Climapest-FACE (DaMatta et al., 2016; Rakocevic et al., 2021).

Além das alterações nas taxas de trocas gasosas, a exposição dos cafeeiros ao aumento da  $[CO_2]$ , avaliada no quarto e quinto ano de tratamento, possibilitou verificar modificações estruturais, tais como redução drástica da área foliar e do diâmetro de ramos plagiotrópicos de segunda ordem e maiores investimentos em ramos de terceira e quinta ordens, além de grandes investimentos em estruturas reprodutivas no terceiro e quarto estrato do perfil vertical, os quais apresentaram maiores quantidades de frutos. Adicionalmente, foi verificada alta capacidade de adaptação das folhas à variação de radiação solar ao longo do perfil vertical, bem como aclimação das folhas a temperaturas elevadas, especialmente aquelas localizadas nos estratos superiores. Tais modificações sugerem que os cafeeiros expostos ao aumento da  $[CO_2]$ , no longo prazo, desenvolvem modificações morfofuncionais capazes de compensar perdas de área foliar através da realocação de fotoassimilados da parte aérea para as raízes, de forma a proporcionar melhor aproveitamento da água e adaptabilidade às altas temperaturas e luminosidade, mantendo altas taxas fotossintéticas (Rakocevic et al., 2018; 2020; 2021).

Além de modificações morfofuncionais, as plantas cultivadas sob aumento da  $[CO_2]$  podem sofrer alterações químicas, especialmente nas concentrações de compostos secundários que possam interferir na resistência às doenças ou na interação com pragas. Parte do carbono assimilado em consequência de maiores taxas fotossintéticas sob aumento da  $[CO_2]$  é direcionada à síntese de compostos fenólicos, os quais são fundamentais na adaptação a modificações ambientais e na coevolução com pragas e doenças (Campa et al., 2012). Sabe-se que a atividade de alguns patógenos é interrompida ou controlada quando grandes quantidades de compostos fenólicos são produzidas em folhas de cafeeiros resistentes ao bicho mineiro (*Leucoptera coffeella*) (Magalhães et al., 2010) e à ferrugem do cafeeiro causada pelo fungo *H. vastatrix* (Silva et al., 2006).

Batista et al. (2021) verificaram na cultivar Catuaí IAC-144 que o cultivo sob aumento da  $[CO_2]$  reduziu a concentração de ácido clorogênico (5-CQA), que é o principal fenólico constituinte das folhas de cafeeiros, importante tanto na determinação da qualidade dos frutos e da bebida, quanto no controle da germinação das sementes e

do crescimento celular através da regulação do hormônio indol-acético. Poucos efeitos do aumento da  $[CO_2]$  foram encontrados nos teores fenólicos de folhas de cafeeiros cultivados no Climapest-FACE; por outro lado, efeitos significativos da sazonalidade climática foram detectados, indicando baixas concentrações de fenólicos foliares nas épocas secas e altas concentrações em épocas chuvosas. As restrições difusivas impostas à assimilação de carbono no mesófilo foliar, reduzindo a disponibilidade de carbono para a produção de compostos secundários, especialmente nas épocas secas, ajudam a explicar a redução de ácido clorogênico observada nesses períodos. Adicionalmente, não foram verificados efeitos do aumento da  $[CO_2]$  na abundância e diversidade de ácaros nas folhas de cafeeiros, porém a variação climática sazonal influenciou de maneira significativa a diversidade de ácaros, resultando em maior diversidade na época seca.

Os principais problemas fitossanitários do café e interações multitróficas foram avaliados no Climapest-FACE (Tabela 24.2). Em relação à incidência da ferrugem e à mancha-de-Cercospora, causada por *Cercospora coffeicola*, não foram observados efeitos do aumento da  $[CO_2]$  para ambas as cultivares (Ghini et al., 2015). Entretanto, é importante considerar que as condições climáticas (alta temperatura e seca) durante os dois anos não foram favoráveis à ocorrência das doenças e, além disso, foram realizadas as aplicações recomendadas de fungicidas ao longo do ciclo da cultura, conforme ocorre nos cultivos comerciais. Em avaliações realizadas nos anos de 2014 e 2015 na cultivar Catuaí IAC-144, Iost (2017) também não observou efeito do aumento da  $[CO_2]$  sobre a ferrugem do cafeeiro. O micoparasitismo da ferrugem também não teve influência do aumento da  $[CO_2]$ .

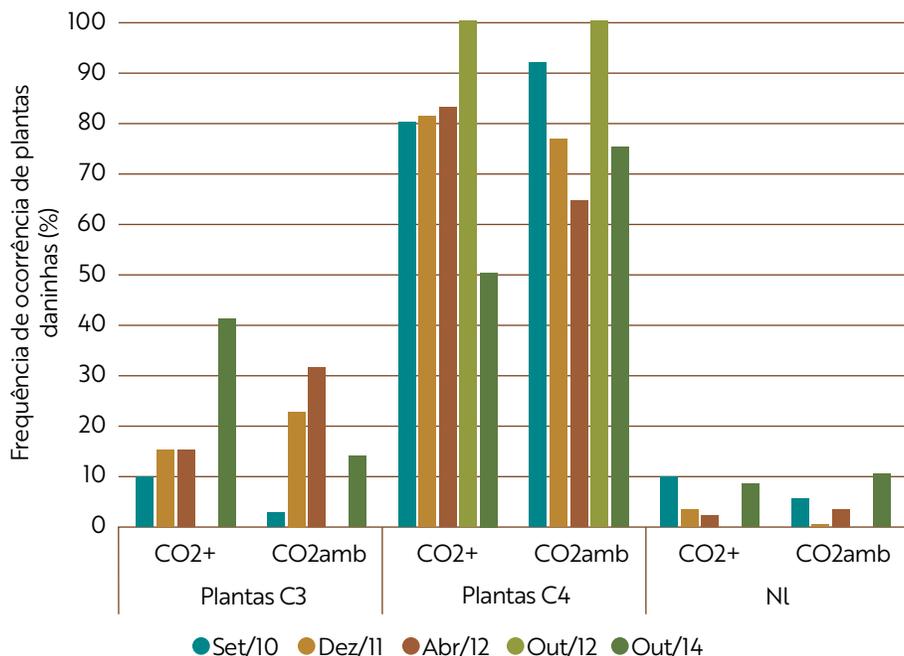
Abreu et al. (2015) monitoraram isolados endofíticos de *Colletotrichum* sp. obtidos de folhas do cafeeiro (não patogênicos) no Climapest-FACE. Os autores observaram que não houve efeito do aumento da  $[CO_2]$  no número desses isolados, independentemente da cultivar avaliada (Catuaí e Obatã). A matriz de similaridade, baseada em características morfológicas dos isolados, permitiu agrupá-los em função da cultivar e não do aumento da  $[CO_2]$ . O maior número de isolados foi obtido no inverno (julho) indicando que a época de coleta, junto com a cultivar, influenciaram esse monitoramento. Ferreira (2017), em outro estudo mais amplo, baseado no sequenciamento genômico da comunidade de microrganismos endofíticos obtidos de ramos e frutos, observou maior diversidade da microbiota endofítica do cafeeiro mantido em condições de aumento da  $[CO_2]$ . Houve predominância de bactérias do filo Proteobacteria, distribuídas nas classes Alphaproteobacteria, Betaproteobacteria e Gammaproteobacteria, e os demais filos encontrados foram Actinobacteria e Firmicutes.

A incidência do bicho-mineiro, uma das pragas mais importantes do cafeeiro, apresentou redução quando avaliada em aumento da  $[CO_2]$  (Ghini et al., 2015; Iost, 2017). Entretanto, a ação de inimigos naturais do bicho-mineiro, avaliada através da

recuperação de parasitoides emergidos de minas foliares e da análise de minas pre-dadas, não apresentou alteração em condição de maior concentração de CO<sub>2</sub> (Pires et al., 2014a; Ghini et al., 2015), sendo *Proacrias coffeae* a espécie de parasitoide predominante em ambos os tratamentos (Pires et al., 2014a). Dos insetos-praga que atacam os frutos, não houve infestação de brocas durante o período de avaliação (2012 a 2016). Os frutos, entretanto, apresentaram alta infestação por moscas-das-frutas da espécie *Ceratitits capitata* (Wiedemann, 1824) (Diptera: Tephritidae) em condições de aumento da [CO<sub>2</sub>] e [CO<sub>2</sub>] ambiente (Pires et al., 2014b). A quantidade de parasitoides emergidos dos frutos infestados por moscas-das-frutas também não sofreu alteração, considerando a análise de todos os anos de coleta. É importante observar que os insetos avaliados no Climapest-FACE não estavam confinados nos tratamentos, sendo possível a dispersão de insetos voadores entre áreas com aumento da [CO<sub>2</sub>] e com [CO<sub>2</sub>] ambiente, caracterizando, em certo ponto, uma avaliação da escolha desses indivíduos em relação aos tratamentos.

O complexo de cigarrinhas (Hemiptera: Cicadellidae), associado à cultura do café, que transmite a bactéria *Xylella fastidiosa* e causa a doença conhecida como atrofia dos ramos do cafeeiro (ARC) e seu simbionte primário – “Candidatus Sulcia muel-leri” –, foi estudado por dois anos no Climapest-FACE. Ao todo foram capturados 9.446 espécimes de cigarrinhas da família Cicadellidae pertencentes a 10 espécies, sendo 4.980 no tratamento com aumento de CO<sub>2</sub> e 4.466 no tratamento controle. Utilizando *primers* específicos para detecção de *X. fastidiosa* e do simbionte observou-se que a porcentagem de cigarrinhas positivas para *X. fastidiosa* foi extremamente baixa em comparação com a detecção do simbionte e não houve efeito do aumento da [CO<sub>2</sub>] nessa interação multitrófica (Prado et al., 2012; Dorneles Junior et al., 2016).

A determinação da incidência e diversidade de plantas daninhas no sistema de produção de café integrado com braquiária também foi realizada no Climapest-FACE, usando tanto a avaliação direta da frequência de plantas em campo como do banco de sementes remanescentes na área. Verificou-se, após quatro anos de tratamento contínuo, maior incidência de espécies C<sub>4</sub> (64% para avaliação de plantas e 63% para banco de sementes) em relação à C<sub>3</sub> (28% para plantas e 29% para banco de sementes) e não identificadas (8%) (Figura 24.4). Cabe destacar que as espécies de plantas encontradas foram, para C<sub>3</sub>: a) *Ipomoea grandifolia* (corda-de-viola); b) *Bidens pilosa* (picão preto); c) *Eupatorium* sp. (mata-pasto); d) *Emilia sonchifolia* (falsa serralha); e) *Cleome affinis* (mussambê); f) *Phyllanthus tenellus* (quebra pedra). E para C<sub>4</sub>: a) *Brachiaria* spp. (braquiária); b) *Commelina benghalensis* (traçoeraba); c) *Amaranthus retroflexus* (caruru); d) *Digitaria* spp. (digitária); e) *Rhynchelytrum repens* (capim favorito); f) *Chamaesyce hyssopifolia* (erva-de-santa-luzia); g) *Sida* spp. (guanxuma); h) *Portulaca oleracea* (beldroega); i) *Cenchrus* spp. (carrapicho); j) *Cyperus rotundus* (tiritica); e k) *Richardia brasiliensis* (poaia branca).

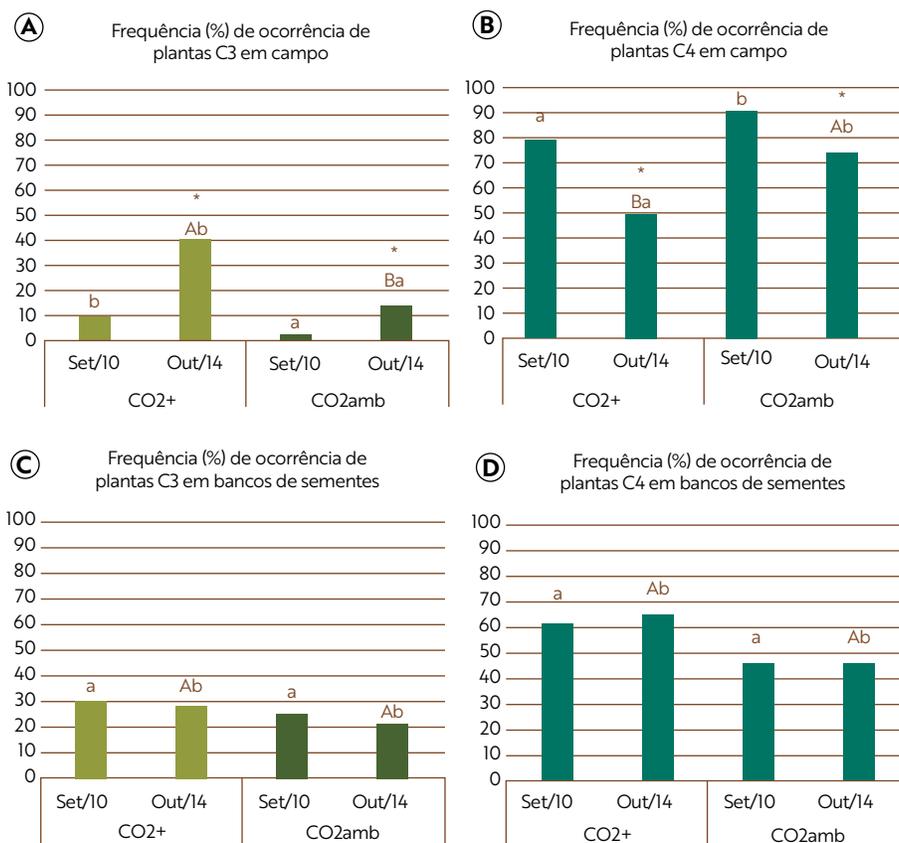


**Figura 24.4.** Frequência (%) de ocorrência de plantas daninhas C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> e não identificadas (NI), submetidas ao ambiente com aumento da [CO<sub>2</sub>] (CO<sub>2</sub>+) e ambiente com [CO<sub>2</sub>] atual (CO<sub>2</sub>amb.) por um período de quatro anos de produção em campo de café integrado com braquiária no Climapest-FACE em Jaguariúna, SP.

No levantamento das plantas em campo, considerando o aumento ou não da [CO<sub>2</sub>] propriamente dito, verificou-se que a frequência de espécies C<sub>3</sub> (Figura 24.5A) foi significativamente maior em condições de aumento da [CO<sub>2</sub>] (41%) em relação ao ambiente controle (14%), favorecida pelo aumento do picão preto (*B. pilosa*), enquanto para C<sub>4</sub> (Figura 24.5B) o resultado se inverte, sendo maior a frequência no ambiente controle (75%) em relação ao ambiente com aumento [CO<sub>2</sub>] (52%), com dominância da braquiária (*Brachiaria* spp.).

Comparando os resultados das avaliações do banco de sementes realizadas antes do início da injeção do CO<sub>2</sub> (agosto de 2010) e após três anos de injeção contínua de CO<sub>2</sub> contínuo (outubro de 2014) confirmou-se o predomínio das plantas C<sub>4</sub> em relação às C<sub>3</sub>, como já verificado para as avaliações de campo. Não houve diferenças significativas entre o aumento de [CO<sub>2</sub>] e o ambiente natural, tanto para espécies C<sub>3</sub> (Figura 24.5C), como C<sub>4</sub> (Figura 24.5D). Entretanto, mesmo que a frequência não tenha se alterado estatisticamente, foi possível perceber mudanças nas espécies, com

aumento na prevalência de picão preto, em áreas com aumento da  $[CO_2]$ , reforçando as informações de aumento desta espécie nas análises em campo. Para as espécies C4 (Figura 24.5D), houve redução tímida da braquiária com domínio no banco de outras espécies.



**Figura 24.5.** Frequência (%) de ocorrência de plantas daninhas C3 (A) e (C); e C4 (B) e (D) em campo e em banco de sementes, respectivamente, avaliadas na instalação do experimento Climapest-FACE (setembro de 2010) e após quatro anos de injeção contínua de  $CO_2$  (outubro de 2014) nos tratamentos de aumento da  $[CO_2]$  (CO<sub>2</sub>+) e de ambiente com  $[CO_2]$  atual (CO<sub>2</sub>amb.) para a produção de café integrado com braquiária. Médias com mesma letra minúscula não diferem entre si entre os períodos de avaliação dentro do mesmo tratamento e com mesma letra maiúscula não diferem entre os tratamentos em outubro de 2014. Médias com asterisco diferem entre si considerando os tratamentos em outubro de 2014.

As alterações na frequência e nas espécies já são indicativos de que as mudanças nas concentrações de CO<sub>2</sub> merecem atenção para possíveis necessidades de alterações no controle de plantas daninhas. Podem ocorrer mudança nas estratégias de uso de agroquímicos, com mudanças de moléculas, e dos períodos de aplicação, que podem ser encurtados ou ampliados em função de uma possível mudança no ciclo de ação das plantas nessas novas condições. Vale ressaltar que não foram feitas simulações de mudanças de temperatura, que são as possíveis consequências do aumento da [CO<sub>2</sub>] em campo, o que poderia alterar os resultados obtidos neste estudo.

Em função da importância mundial do café, tanto econômica quanto social, e dos riscos sobre sua produção associados às mudanças climáticas, o Climapest-FACE gerou informações inéditas sobre os efeitos do aumento da [CO<sub>2</sub>] sobre a cultura e os problemas fitossanitários. O conhecimento obtido, não só com a cultura do café, mas com várias culturas de importância econômica, subsidia a adoção de estratégias de manejo integrado de problemas fitossanitários em ambientes agrícolas projetados em cenários de mudanças climáticas com aumento da [CO<sub>2</sub>].

**Tabela 24.2.** Resultados de estudos conduzidos no Climapest-FACE considerando parâmetros relacionados à fisiologia, morfologia, problemas fitossanitários e interações multitróficas no cafeeiro em diferentes cultivares e períodos de avaliação.

Parâmetro avaliado	Cultivar	Período de avaliação	Efeito do aumento da concentração de CO <sub>2</sub>	Referências
Fotossíntese	Catuai	2011–2014	Aumento da taxa fotossintética e da eficiência do uso da água	Ghini et al. (2015)
	Obatã	2011–2013		
	Catuai	2014–2015	Aumento da taxa líquida da fotossíntese associada a poucas alterações na condutância estomática Aumento da eficiência do uso da água especialmente na época seca	Rakocevic et al. (2018; 2020; 2021)
	Catuai/Obatã	2011–2015	Não houve efeito na aclimação ou retrorregulação da fotossíntese	DaMatta et al. (2016); Rakocevic et al. (2021)
Crescimento/desenvolvimento	Catuai	2011–2014	Aumento do crescimento das plantas e da produtividade em 14,6% em Catuai e 12,0% em Obatã	Ghini et al. (2015)
	Obatã	2011–2013		
	Catuai	2014–2015	Aumento do diâmetro e altura das plantas	Iost (2017)
	Catuai	2014–2016	Redução da área foliar e do diâmetro de ramos plagiotrópicos de segunda ordem Aumento em ramos de terceira e quinta ordens; de estruturas reprodutivas no terceiro e quarto estratos e da capacidade de adaptação das folhas à variação de radiação solar	Rakocevic et al. (2018; 2020; 2021)

Continua...

Tabela 24.2. Continuação.

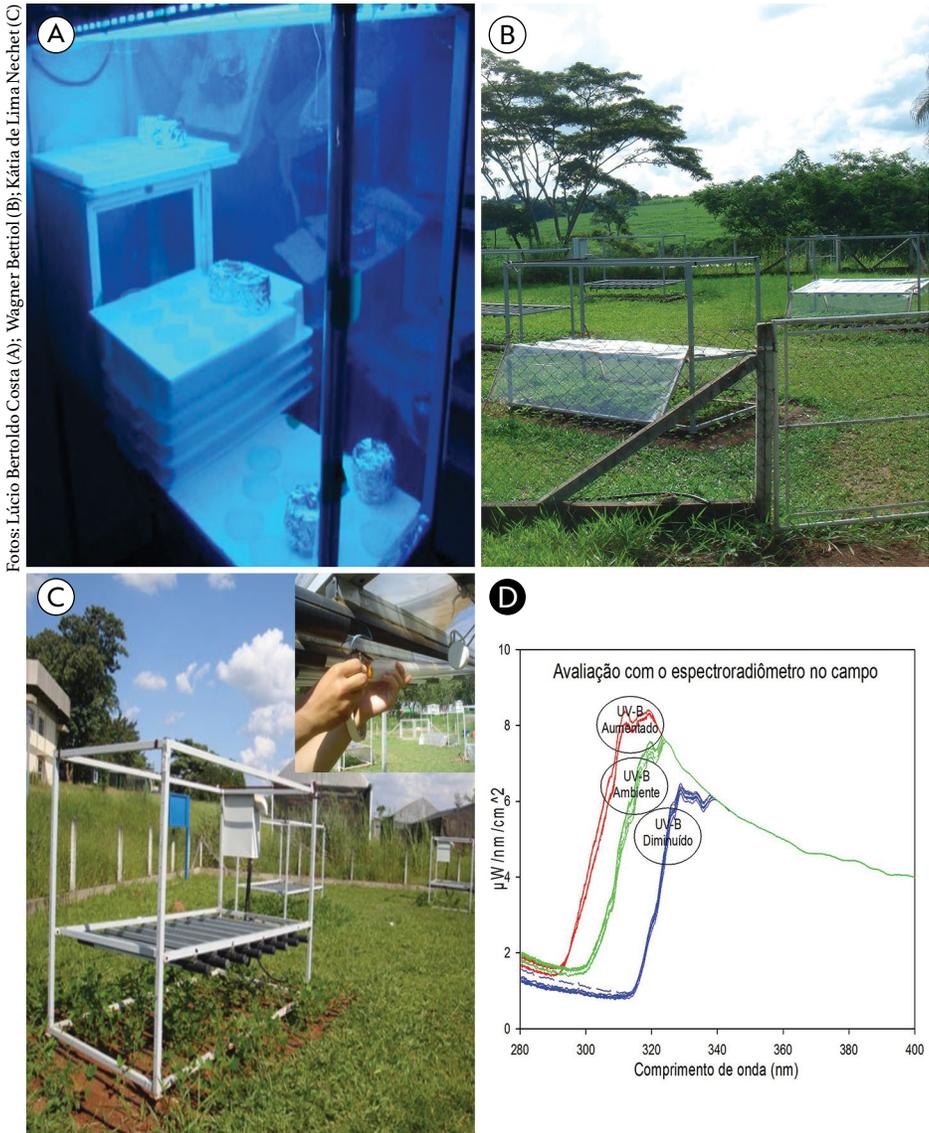
Parâmetro avaliado	Cultivar	Período de avaliação	Efeito do aumento da concentração de CO <sub>2</sub>	Referências
Alterações químicas	Catuai	2012–2014	Redução da concentração de ácido clorogênico; sem alteração nos teores fenólicos	Batista et al. (2021)
Ferrugem ( <i>Hemileia vastatrix</i> )	Catuai	2011–2014	Não houve efeito na incidência da ferrugem	Ghini et al. (2015)
	Obatã	2011–2013		
	Catuai	2014–2015	Não houve efeito na incidência da ferrugem	Iost (2017)
Microrganismos endofíticos	Catuai/Obatã	2012–2014	Sem alteração nos isolados endofíticos de <i>Colletotrichum</i> sp.	Abreu et al. (2015)
	Catuai	2013–2015	Aumento da diversidade da microbiota e predominância de proteobactérias	Ferreira (2017)
Mancha-de-cercospora ( <i>Cercospora coffeicola</i> )	Catuai	2011–2013	Não houve efeito na incidência da mancha-de-cercospora	Ghini et al. (2015)
	Obatã	2011–2013		
Bicho-mineiro ( <i>Leucoptera coffeella</i> )	Catuai	2011–2015	Redução na incidência de bicho-mineiro (2011–2013; 2013–2015)	Ghini et al. (2015); Iost (2017).
	Obatã	2011–2013		
Parasitoides de larvas de <i>L. coffeella</i>	Catuai	2012–2015	Não houve alteração da quantidade e nem da análise ecológica dos parasitoides (2012 e 2013)	Ghini et al. (2015); Pires et al. (2014a)
	Obatã	2012–2014		
Predação de minas de <i>L. coffeella</i>	Catuai	2013–2015	Não houve alteração da porcentagem de minas predadas (2013)	Ghini et al. (2015)
	Obatã	2013–2014		
Moscas-das-frutas ( <i>Ceratitis capitata</i> )	Catuai	2014–2016	Não houve alteração do número de frutos infestados (2014)	Pires et al. (2014b)
Parasitoides de <i>C. capitata</i>	Catuai	2014–2016	Não houve alteração da quantidade de frutos parasitados	Dados não publicados
Acaros	Catuai	2012–2016	Não houve alteração da quantidade total e nem do número de espécies (2012–2016)	Batista et al. (2021)
	Obatã	2012–2014	Não houve alteração da quantidade total e nem do número de espécies (2012–2014)	
Cigarrinha (Cicadellidae)	Catuai/Obatã	2013–2015	Não houve efeito na interação com simbionte primário – “ <i>Candidatus Sulcia muelleri</i> ”	Prado et al. (2012); Dorneles Junior et al. (2016)
Plantas daninhas	-	2010–2015	Maior incidência de C4 em relação à C3 Maior frequência C3 ( <i>Bidens pilosa</i> )	Dados não publicados

## RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA B

A camada de ozônio funciona como um importante e indispensável filtro da radiação solar, principalmente à radiação UV (Godin-Beekmann, 2010). Os comprimentos de onda na faixa de 100 nm a 400 nm constituem a região espectral da radiação UV, dividida em três faixas: radiação UV-A (315 a 400 nm), que é levemente filtrada pela camada de ozônio e atinge a superfície terrestre (Paul, 2000); radiação UV-B (290 a 315 nm), que é filtrada pela camada de ozônio; e radiação UV-C (100 a 280 nm), que é absorvida por outros gases, incluindo o ozônio (Madronich et al., 1995; Paul, 2000). Assim, dos três tipos de radiação, a radiação UV-B é a que apresenta maior risco: por conta da redução da camada de ozônio, tem alta incidência em algumas regiões da Terra, causando sérios prejuízos à saúde pública (Jones, 1992).

Há uma estimativa de 15 a 20% de aumento na incidência da radiação UV-B durante o século XXI (Watanabe et al., 2011) e existe uma grande variabilidade na radiação UV-B devida a outros fatores, além do ozônio, como nuvens, aerossóis e outros poluentes, bem como latitude, altitude e época do ano (Bilbao et al., 2014; Fioletov et al., 2002). A radiação UV-B é absorvida diretamente pelos ácidos nucleicos, lipídeos e proteínas, o que leva a modificações nas macromoléculas, entre elas no DNA. Muitos estudos demonstraram os efeitos do aumento da radiação UV-B em diferentes ecossistemas e organismos (Unep, 2015; Chakraborty; Newton, 2011). A radiação UV pode agir direta e indiretamente sobre as doenças de plantas, por causar danos às estruturas tanto dos fitopatógenos quanto dos agentes de biocontrole, tais como induzir mudanças na fisiologia das plantas (Kunz et al., 2006; Paul, 2000; Manning; Tiedeman, 1995).

As respostas à radiação UV-B são dependentes do patossistema e a maioria dos resultados é obtida em condições controladas, importantes para verificar efeitos pontuais, mas que podem superestimar essas respostas, uma vez que as plantas e os microrganismos são expostos a uma dose alta e constante durante toda a experimentação (Caldwell; Flint, 1994). Na Embrapa Meio Ambiente, estudos que simularam o aumento da radiação UV-B foram conduzidos tanto em condições controladas como em condições de campo (Figuras 24.6A e 24.6B). Nessas condições, o sistema de controle permitiu um aumento de 20% na radiação UV-B em função da radiação solar monitorada no momento, através do uso de lâmpadas UV-B 313 (Q-lab Cleveland, Ohio, EUA). Por outro lado, também foram utilizados painéis para reduzir a radiação UV-B em 80% por meio de filmes específicos de poliéster (OD 125\_m, Dupont), o que permitiu comparar tratamentos que simulavam diferentes doses de radiação UV-B (Figuras 24.6C e 24.6D). Esse sistema foi o primeiro a ser implementado no Brasil e foi baseado em estruturas similares descritas por Caldwell et al. (1983) e Flint e Caldwell (2003) com modificações (Nechet et al., 2015).



**Figura 24.6.** Estruturas utilizadas para simulação de aumento de radiação UV-B em condições controladas (A) e de campo (B) na Embrapa Meio Ambiente; detalhes dos painéis de simulação (C); gráfico demonstrando as diferentes doses de UV-B simuladas em campo (D).

Diversos estudos foram desenvolvidos no Laboratório de Microbiologia Ambiental “Raquel Ghini” da Embrapa Meio Ambiente para avaliar os efeitos do aumento da radiação UV-B sobre agentes de biocontrole. Costa et al. (2012) e Costa et al. (2013) observaram que a elevação na radiação UV-B causou forte efeito deletério sobre os conídios de *Clonostachys rosea*, agente de controle biológico de *Botrytis cinerea*, além de reduzir a colonização de discos de folhas de morango e de feijão. Os autores ainda observaram que a radiação UV-B reduziu a habilidade antagonônica de *C. rosea* para o controle de *B. cinerea*. Esses autores também observaram variação na sensibilidade da germinação de isolados de *C. rosea* submetidos ao aumento de radiação UV-B e na colonização de discos de folhas de feijão. Uma observação importante é que *B. cinerea* foi menos afetado pela radiação UV-B do que *C. rosea* (Costa et al., 2016).

Galvão e Bettiol (2014) observaram que o aumento da radiação UV-B inativou ou atrasou a germinação de esporos de *Lecanicillium lecanii*, fungo que naturalmente controla a ferrugem do cafeeiro causada por *H. vastatrix*. Também observaram que existe variação na sensibilidade à radiação UV-B de isolados de *L. lecanii*, pois a colonização de pústulas de ferrugem, em discos de folhas de café, pelo antagonista, também foi afetada. Esses resultados são importantes para as empresas que comercializam agentes de biocontrole, uma vez que indicam claramente a necessidade da inclusão de protetor solar em suas formulações.

Em feijoeiro cultivado em condições de campo sob aumento da radiação UV-B, Costa (2011) observou a redução na colonização das folhas por *C. rosea*. Em outro estudo conduzido em campo aberto houve a infecção latente de fungos na cultura do morango durante duas estações de cultivo. Nechet et al. (2015) verificaram que o aumento da radiação UV-B não teve efeito sobre a incidência de *Rhizopus nigricans* e *B. cinerea*. Porém, a incidência de *Colletotrichum acutatum* foi maior na estação chuvosa, indicando que a antracnose do morangueiro pode vir a ser um problema em condições de aumento de radiação UV-B associado à alta precipitação pluviométrica.

O aumento da radiação UV-B também não teve efeito sobre a habilidade de *C. rosea* para controlar o mofo cinzento causado por *B. cinerea*, tanto na estação chuvosa como na estação seca (Nechet et al., 2017). Importante ressaltar que esse isolado de *C. rosea* utilizado nos ensaios de campo foi previamente selecionado por Costa et al. (2012), em condições controladas, por apresentar maior tolerância às doses de aumento da radiação UV-B. O controle biológico ocorreu por antagonismo e não por indução de resistência, uma vez que não houve variação na expressão das enzimas peroxidases e quitinases nas plantas expostas às diferentes condições de radiação UV-B. Aumento na expressão da enzima polifenol oxidase foi observado na estação chuvosa, mas esse aumento não teve correlação com a redução da incidência da doença (Nechet et al., 2017).

Em um cenário de aumento de radiação UV-B, o uso de agente de controle biológico tolerante ao UV-B, selecionado em condições controladas, e utilizado em con-

dições de cultivo é fundamental para manter esta estratégia como um método de controle eficiente, o que demonstram os estudos conduzidos para essas culturas de importância econômica para o país. A interação entre radiação UV-B e outras variáveis climáticas (aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, seca e temperatura) também deve ser considerada (Caldwell et al., 2007; Wu et al., 2009).

## TEMPERATURA

O cenário de aumento da temperatura em até 4,8 °C, previsto pelo IPCC (2013), pode interferir tanto no desenvolvimento da planta hospedeira, quanto no ciclo de vida de patógenos e pragas, afetando a suscetibilidade do hospedeiro e os mecanismos de virulência do patógeno. Estas respostas influenciarão a ocorrência das epidemias, uma vez que a temperatura interfere em todas as fases do ciclo de desenvolvimento do patógeno (germinação, infecção, incubação, colonização, reprodução e sobrevivência), aumentando ou reduzindo a severidade das doenças (Angelotti et al., 2017b).

Para entender como o aumento da temperatura impactará a defesa vegetal, experimentos em condições controladas têm sido realizados, e geraram resultados que auxiliam na compreensão da ocorrência da epidemia no campo. Os dados obtidos fornecem informações para a elaboração e a validação de modelos matemáticos que explicam o desenvolvimento de doenças e pragas. Entre os ambientes controlados destacam-se as incubadoras tipo BOD. (*body oxygen demand*) e as câmaras de crescimento tipo Fitotron. O uso de BOD para a experimentação agrícola é de longa data na Fitopatologia e na Entomologia, de modo que muitos estudos são realizados com temperaturas constantes. Entretanto, os avanços tecnológicos permitiram o uso de equipamentos como as câmaras de crescimento tipo Fitotron, que simulam a variação da temperatura ao longo do dia e a interação com outros elementos climáticos (Angelotti et al., 2017; Araújo et al., 2019; Gullino et al., 2017; Santos et al., 2020).

O aumento da temperatura do ar poderá causar uma redução na severidade do oídio do feijão-caupi, do meloeiro e da videira, com um aumento do período latente, o que poderá ter um impacto positivo por retardar a epidemia no campo (Magalhães et al., 2011; Santana, 2013; Araújo et al., 2019). Outro resultado importante obtido nos estudos foi a redução do período de incubação da bactéria *Xanthomonas campestris* pv. *viticola*, agente causal do cancro bacteriano na videira. A favorabilidade climática para a ocorrência desta doença é uma preocupação para a defesa agropecuária, sendo este resultado importante para que medidas adaptativas sejam tomadas para a prevenção em áreas de produção livre da bactéria (Angelotti et al., 2017c).

Temperaturas a partir de 32 °C causaram impacto negativo sobre a biologia do pulgão *Rhopalosiphum padi*. Entretanto, o inseto encontra condições favoráveis para sobrevivência e reprodução em uma ampla faixa de temperatura (12–28 °C) (Auaud et

al., 2009). A lagarta da soja (Silva et al., 2012) e a cigarrinha das pastagens (Fonseca et al., 2016) sofrem impacto negativo do aumento da temperatura, mas vale ressaltar que os estudos em condições controladas sobre os ciclos de vida restritos não permitem inferir sobre a adaptação das espécies, uma vez que o aumento da temperatura será um processo gradativo ao longo dos anos (Silva et al., 2012). De qualquer maneira, somente a partir do conhecimento do efeito da temperatura na biologia das pragas e os possíveis impactos para os cultivos é que serão elucidados os efeitos das mudanças climáticas na distribuição geográfica e temporal de problemas fitossanitários.

Esses e outros estudos sobre o efeito do aumento da temperatura sobre problemas fitossanitários e os principais resultados estão apresentados na Tabela 24.3.

**Tabela 24.3.** Impacto do aumento da temperatura na ocorrência de problemas fitossanitários.

Hospedeiro	Problema fitossanitário	Estrutura utilizada para simular o aumento da temperatura	Efeito do aumento da temperatura	Referência
Coco ( <i>Cocos nucifera</i> )	<i>Thielaviopsis paradoxa</i> (resinose)	BOD (temperatura constante)	Desenvolvimento ótimo 28 °C	Costa et al. (2011)
Feijão-caupi ( <i>Vigna unguiculata</i> )	<i>Oidium</i> sp. (oidio)	BOD (temperatura alternada)	Redução	Santana (2013)
	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>tracheiphilum</i> (murcha de fusarium)	BOD (temperatura constante)	Aumento	Barbosa et al. (2011)
Forrageiras	<i>Mahanarva spectabilis</i> (cigarrinha-das-pastagens)	BOD (temperatura constante)	Redução	Fonseca et al. (2016)
	<i>Sipha flava</i>	BOD (temperatura constante)		
Melão ( <i>Cucumis melo</i> )	<i>Oidium</i> sp. (oidio)	Câmara de crescimento (temperatura alternada)	Redução	Oliveira et al. (2009), Araujo et al. (2019)
Milho ( <i>Zea mays</i> )	<i>Spiroplasma kunkelii</i> (enfezamento pálido)	Casa de vegetação	Aumento	Oliveira et al. (2010)
Pêssego ( <i>Prunus persica</i> )	<i>Ceratitis capitata</i> (Mosca-das-frutas)	Temperatura constante	Populações de diferentes regiões do país têm a sua biologia alternada	Ricalde et al. (2012)
Soja ( <i>Glycine max</i> )	<i>Anticarsia gemmatilis</i> (lagarta da soja)	BOD (temperatura constante)	Redução	Silva et al. (2012)
Videira ( <i>Vitis vinifera</i> )	<i>Phakopsora euwitii</i> (ferrugem)	BOD (temperatura constante)	Redução	Angelotti (2006)
	<i>Plasmopara viticola</i> (mildio)		Redução	Angelotti et al. (2017a)
	<i>Oidium tuckeri</i> (oidio)	Redução	Magalhães et al. (2011)	
	<i>Xanthomonas campestris</i> pv. <i>viticola</i> (cancro bacteriano)	Redução no período de incubação.	Conceição et al. (2017)	

Assim, diante do cenário de mudanças climáticas, será de primordial importância a compreensão da relação entre os problemas fitossanitários e os elementos climáticos (aumento de temperatura, alterações dos padrões de precipitação, etc.) obtida por meio de experimentação. Esse conhecimento empírico aperfeiçoará os estudos dos impactos das mudanças climáticas sobre a distribuição geográfica e temporal, adotando a metodologia de mapeamento citada por Hamada e Ghini (2017), que utilizam as projeções dos modelos climáticos globais do IPCC para simular o clima futuro e vinculam-nas às predições dos problemas fitossanitários, com base no Sistema de Informações Geográficas.

As alterações na dinâmica dos problemas fitossanitários provocadas pelo aumento da temperatura do ar terão efeito direto nas práticas de manejo. A eficácia e persistência dos pesticidas químicos e o desenvolvimento de resistência em populações ainda são áreas que necessitam de mais estudos. Em ambiente natural, há interação da temperatura com os outros elementos climáticos. Assim, experimentos que simulem a interação de fatores também serão necessários. Avanços que incluam análises sobre a resistência genética da planta hospedeira também contribuirão para a adoção de medidas de adaptação, uma vez que os estresses abióticos, intensificados pelas mudanças climáticas, podem alterar a predisposição da planta hospedeira e provocar a quebra de resistência, aumentando a severidade das epidemias. Ressalta-se que somente após a avaliação dos impactos das mudanças climáticas é que medidas de adaptação por meio da adoção de práticas de controle eficientes e sustentáveis poderão ser adotadas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento de instrumentação para simular modificações nos elementos climáticos é fundamental para os estudos dos efeitos das mudanças climáticas nos componentes dos sistemas agrícolas. Considerando os resultados observados nos anos de estudo, verificamos que o efeito do aumento da  $[CO_2]$  e da temperatura do ar podem alterar de maneira significativa a incidência e a severidade de doenças em plantas e a infestação de insetos-pragas, plantas daninhas, e suas interações multi-tróficas, com variação para os diferentes cultivos agrícolas. A seleção de agentes de controle biológico tolerantes ao aumento da radiação UV-B é fundamental para manutenção desse método de controle em cenários futuros.

Os resultados apresentados foram obtidos em parceria com as seguintes instituições: Embrapa Semiárido, Embrapa Uva e Vinho, Embrapa Soja, Embrapa Milho e Sorgo, Embrapa Amazônia Oriental, Embrapa Instrumentação, Embrapa Café, Instituto Agrônomo, Instituto Biológico de São Paulo, Instituto de Botânica, Instituto

Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Energia Nuclear na Agricultura-Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, Universidade Federal de Lavras, Universidade Federal de Viçosa, Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Ciências Agrônomicas - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e Universidade do Vale do Paraíba.

Os seguintes projetos foram executados para a obtenção dos resultados apresentados:

Impactos das mudanças climáticas globais sobre problemas fitossanitários (Climapest). Instituição: Embrapa Meio Ambiente (Edital Embrapa 06/2007);

Impacto das mudanças climáticas sobre doenças e pragas em cultivos de importância para a agroindústria da Argentina e do Brasil (Climafitos). Instituição: Embrapa Meio Ambiente (Edital Embrapa 22/2011 - Cooperação Internacional Embrapa/INTA);

Impacto das mudanças climáticas nas doenças em cultivos: projeto de cooperação técnica Brasil-Argentina (Climafitos 2). Instituição: Embrapa Meio Ambiente (Edital Embrapa 00/2018 - Projetos Cofinanciados 2018 - Nacional e Internacional);

Impacto do aumento da concentração de dióxido de carbono atmosférico e disponibilidade de água sobre a cultura do café em experimento FACE (“free air carbon-dioxide enrichment” (Climapest-FACE). Instituição: Embrapa Meio Ambiente (Edital Embrapa Macroprogramas 1, 2, 3 e 6);

Efeito da radiação UV-B no controle biológico de *Botrytis cinerea* do morango com *Clonostachys rosea*. Instituição: Embrapa Meio Ambiente (Edital Embrapa 06/2010; CNPq Processo 474797/2011-2);

Efeitos da Alta Concentração Atmosférica de CO<sub>2</sub> [CO<sub>2</sub>]<sub>atm</sub> em Câmaras de Topo Aberto e Sistema FACE sobre a Fotossíntese e os Mecanismos Naturais de Resistência do Cafeeiro à Ferrugem. Instituição: Instituto de Botânica. (FAPESP 12/08875-3);

Modelagem de arquitetura de cafeeiros arábica acoplada com funções fisiológicas em dois regimes hídricos e os seus impactos na composição química e qualidade de produto. Instituição: Embrapa Informática Edital 02/2013 Macroprograma 02 – Programa Café);

Impacto do aumento do CO<sub>2</sub> na fisiologia de plantas de soja (*Glycine max* L. Merrill), nas características biológicas do percevejo marrom, *E. heros* (Fabricius) (Hemiptera: Pentatomidae) e sua interação com simbioses. Instituição: Embrapa Meio Ambiente. (CNPq Processo: 421754/2016-8).

## REFERÊNCIAS

ABREU, P. F. G. de; NASCIMENTO, R. dos S.; NECHET, K. L. Monitoramento e caracterização de isolados endofíticos de *Colletotrichum sp.* de café em experimento FACE (free air CO<sub>2</sub> enrichment). In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 9., 2015, Campinas. *Anais...* Campinas: Instituto Agrônômico (IAC), 2015. RE n° 15407 8 p.

AINSWORTH, E. A.; ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO<sub>2</sub>]: mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell & Environmental*, v. 30, p. 258–270, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01641.x>.

ALEXANDER, L. V.; ALLEN, S. K.; BINDOFF, N. L.; BRÉON, F.-M.; CHURCH, J. A.; CUBASCH, U.; EMORI, S.; FORSTER, P.; FRIEDLINGSTEIN, P.; GILLET, N.; GREGORY, J. M.; HARTMANN, D. L.; JANSEN, E.; KIRTMAN, B.; KNUTTI, R.; KANIKICHARLA, K. K.; LEMKE, P.; MAROTZKE, J.; MASSON-DELMOTTE, V.; MEEHL, G. A.; MOKHOV, I. I.; PIAO, S.; PLATTNER, G.-K.; DAHE, Q.; RAMASWAMY, V.; RANDALL, D.; RHEIN, M.; ROJAS, M.; SABINE, C.; SHINDELL, D.; STOCKER, T. F.; TALLEY, L. D.; VAUGHAN, D. G.; XIE, S. IPCC, 2013: summary for policymakers. 2013. In: STOKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (ed.). *Climate change 2013: the physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York, 2013. 29 p. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIAR5\\_SummaryVolume\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGIAR5_SummaryVolume_FINAL.pdf). Acesso em: 10 maio 2021.

ALLAN, R. P.; ARIAS, P. A.; BERGER, S.; CANADELL, J. G.; CASSOU, C.; CHEN, D.; CHERCHI, A.; CONNORS, S. L.; COPPOLA, E.; CRUZ, F. A.; DIONGUENIANG, A.; DOBLAS-REYES, F. J.; DOUVILLE, H.; DRIOUECH, F.; EDWARDS, T. L.; ENGELBRECHT, F.; EYRING, V.; FISCHER, E.; FLATO, G. M.; FORSTER, P.; FOXKEMPER, B.; FUGLESTVEDT, J. S.; FYFE, J. C.; GILLET, N. P.; GOMIS, M. I.; GULEV, S. K.; GUTIÉRREZ, J. M.; HAMDI, R.; HAROLD, J.; HAUSER, M.; HAWKINS, E.; HEWITT, H. T.; JOHANSEN, T. G.; JONES, C.; JONES, R. G.; KAUFMAN, D.S.; KLIMONT, Z.; KOPP, R. E.; CHARLES KOVEN, C.; KRINNER, G.; LEE, J.-Y.; LORENZONI, I.; MAROTZKE, J.; MASSON-DELMOTTE, V.; MAYCOCK, T. K.; MEINSHAUSEN, M.; MONTEIRO, P. M. S.; MORELLI, A. NAIK, V.; NOTZ, D.; OTTO, F.; PALMER, M. D.; PINTO, I.; PIRANI, A.; PLATTNER, G.-K.; RAGHAVAN, K.; RANASINGHE, R.; ROGELJ, J.; ROJAS, M.; RUANE, A. C.; SALLÉE, J.-B.; SAMSET, B. H.; SENEVIRATNE, S. I.; SILLMANN, J.; SÖRENSON, A. A.; STEPHENSON, T. S.; STORELVMO, T.; SZOPA, S.; THORNE, P. W.; BLAIR TREWIN, B.; VAUTARD, R.; VERA, C.; YASSAA, N.; ZAEHLE, S.; ZHAI, P.; XUEBIN ZHANG, X.; ZICKFELD, K. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S. L.; PÉAN, C.; BERGER, S.; CAUD, N.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M. I.; HUANG, M.; LEITZELL, K.; LONNOY, E.; MATTHEWS, J. B. R.; MAYCOCK, T. K.; WATERFIELD, T.; YELEKÇI, O.; YU, R.; ZHOU, B. (ed.). *Climate change 2021: the physical science basis. contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press: IPCC, 2021. 31 p. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wgt/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wgt/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf). Acesso em: 22 abr. 2021.

ALLEN, M.; BABIKER, M.; CHEN, Y.; CONINCK, H. de; CONNORS, S.; DIEMEN, R. v.; DUBE, O. P.; EBI, H. L.; ENGELBRECHT, F.; FERRAT, M.; FORD, F.; FORSTER, P.; FUSS, S.; BOLAÑOS, T. G.; JORDAN, H.; HOEGH-GULDBERG, O.; HOURCADE, J.-C.; HUPPMANN, D.; JACOB, D.; JIANG, J.; JOHANSEN, T. G.; KAINUMA, M.; KLEIJNE, K. de; KRIEGLER, E.; LEY, D.; LIVERMAN, D.; MAHOWALD, N.; MASSON-DELMOTTE, V.; MATTHEWS, J. B. R.; MILLAR, R.; MINTENBECK, K.; MORELLI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; MUNDACA, L.; NICOLAI, M.; OKEREKE, C.; PATHAK, M.; PAYNE, A.

PIDCOCK, R.; PIRANI, A.; POLOCZANSKA, E.; PÖRTNER, H.; REVI, A.; RIAHI, K.; ROBERTS, D. C.; ROGELJ, J.; ROY, J.; SENEVIRATNE, S. I.; SHUKLA, P. R.; SKEA, J.; SLADE, R.; SHINDELL, D.; SINGH, C.; SOLECKI, W.; STEG, L.; TAYLOR, M.; TSCHAKERT, P.; WAISMAN, H.; WARREN, R.; ZHAI, P.; ZICKFELD, K. IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V., P.; ZHAI, H.-O.; PÖRTNER, D. R.; SKEA, J.; SHUKLA, P. R.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J. B. R.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M.I.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T. (ed.). **Global warming of 1.5°C: an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty**. Suíça: IPCC, 2018. 24 p. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15\\_SPM\\_version\\_report\\_LR.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf). Acesso em: 12 jun. 2021.

ANDERSON, R.; BAYER, P. E.; EDWARDS, D. Climate change and the need for agricultural adaptation. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 56, p. 197–202, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.12.006>.

ANDRADY, A. L.; AUCAMP, P. J.; AUSTIN, A.; BAIS, A. F.; C. L. BALLARÉ, C. L.; BARNES, P. W.; BERNHARD, G. H.; BORNMAN, J. F.; CALDWELL, M. M.; GRUIJL, F. R. DE; ERICKSON III, D. J.; FLINT, S. D.; GAO, K.; GIES, P.; HÄDER, D.-P.; ILYAS, M.; LONGSTRETH, J.; LUCAS, R.; MADRONICH, S.; MCKENZIE, R. L.; NEALE, R.; NORVAL, M.; PANDY, K. K.; PAUL, N. D.; RAUTIO, M.; REDHWI, H. H.; ROBINSON, S. A.; ROSE, K.; SHAO, M.; SINHA, R. P.; SOLOMON, K. R.; SULZBERGER, B.; TAKIZAWA, Y.; TANG, X.; TORIKAI, A.; TOURPALI, K.; LEUN, J. C. van der; WÄNGBERG, S.-Å.; WILLIAMSON, C. E.; WILSON, S. R.; WORREST, R. C.; YOUNG, A. R.; ZEPP, R. G. Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: 2014 assessment. Executive summary. **Photochemical and Photobiological Sciences**, v. 14, p. 14–18, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/c4pp90042a>.

ANGELOTTI, F. **Epidemiologia da ferrugem (*Phakopsora euvtis*) da videira (*Vitis spp.*)** 2006. 66 f. Tese (Doutorado em Proteção de plantas) - Universidade Estadual de Maringá, Paraná.

ANGELOTTI, F. **Mudanças climáticas e doenças da videira**. In: GALVINCIO, J. D. (org.). **Mudanças climáticas e modelos ambientais: caracterização e aplicação**. Recife: UFPE, 2011. p. 154-177.

ANGELOTTI, F.; GHINI, R.; BETTIOL, W. Como o aumento da temperatura interfere nas doenças de plantas? In: BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A. M.; GHINI, R. (ed.). **Aquecimento global e problemas fitossanitários**. Brasília, DF: Embrapa, 2017b. p. 116-146.

ANGELOTTI, F.; HAMADA, E.; MAGALHÃES, E. E.; GHINI, R.; GARRIDO, L. R.; PEDRO JÚNIOR, M. J. Climate change and the occurrence of downy mildew in Brazilian grapevines. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 6, p. 426-434, 2017a. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000600006>.

ANGELOTTI, F.; HAMADA, E.; PEIXOTO, A. R.; GARRIDO, L. da R. Impacto potencial das mudanças climáticas sobre a distribuição geográfica do cancro-bacteriano da videira no Brasil. In: BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A. M.; GHINI, R. (ed.). **Aquecimento global e problemas fitossanitários**. Brasília, DF: Embrapa, 2017c. p. 243-261.

ARAÚJO, A. L. S.; ANGELOTTI, F.; RIBEIRO JUNIOR, P. M. Severity of melon powdery mildew as a function of increasing temperature and carbon dioxide concentration. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 4, e6916, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i4a6916>

AUAD, A. M.; ALVES, S. O.; CARVALHO, C. A. de; SILVA, D. M. da; RESENDE, T. T. de; VERÍSSIMO, B. A. The impact of temperature on biological aspects and life table of *Rhopalosiphum padi* (Hemiptera: Aphididae) fed with signal grass. **Florida Entomologist**, v. 92, n. 4, p. 569-577, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1653/024.092.0406>.

AUAD, A. M.; FONSECA, M. G. da. A entomologia nos cenários das mudanças climáticas. In: BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A. M.; GHINI, R (ed.). **Aquecimento Global e Problemas Fitossanitários**. Embrapa, Brasília, p. 488, 2017.

BARBOSA, L. G.; PINHEIRO, G. S.; SANTOS, R. M.; ANGELOTTI, F.; MAGALHÃES, E. D. de. Impacto do aumento da temperatura sobre o crescimento e esporulação de *Fusarium oxysporum* f. sp. *tracheiphilum*. In: SIMPÓSIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 3., 2011, Juazeiro. **Experiências para mitigação e adaptação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011. 1 CD-ROM. (Embrapa Semiárido. Documentos, 239).

BATISTA, E. R.; MARINHO-PRADO, J. S.; MINEIRO, J. L. C.; SATO, M. E.; LUIZ, A. J. B.; FRIGHETTO, R. T. S. Increased atmospheric CO<sub>2</sub> combined with local climatic variation affects phenolics and spider mite populations in coffee trees. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, e20190696, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-376520210190696e>.

BILBAIO, J.; ROMAN, R.; YOUSIF, C.; MATEOS, D.; MIGUEL, A. de. Total ozone column, water vapour and aerosol effects on erythemal and global solar irradiance in Marsaxlokk, Malta. **Atmospheric Environmental**, v. 99, p. 508-518, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.10.005>.

CALDWELL, M. M.; BORNMAN, J. F.; BALLARE, C. L.; FLINT, S. D.; KULANDAIVELU, G. Terrestrial ecosystems, increased solar ultraviolet radiation, and interactions with both climate change factors. **Photochemical & Photobiological Sciences**, v. 6, p. 252-266, 2007. DOI: <https://dx.doi.org/10.1039/b700019g>.

CALDWELL, M. M.; FLINT, S. D.; Stratospheric ozone reduction, solar UV-B radiation and terrestrial ecosystems. **Climatic Change**, v. 28, p. 375-394, 1994. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01104080>.

CALDWELL, M.M.; GOLD, W.G.; HARRIS, G.; ASHURST, C.W. A modulated lamp system for solar UV-B (280-320nm). Supplementation studies in the field. **Photochemistry and Photobiology**, v. 37, p. 479-485, 1983.

CAMPA, C.; MONDOLOT, L.; RAKOTONDRAVAO, A.; BIDEI, L. P. R.; GARGADENNEC, A.; COUTURON, E. L. A.; FISCA, P.; RAKOTOMALALA, J. J.; JAY-ALLEMAND, C.; DAVIS, A. P. A survey of magiferin and hydroxycinnamic acid ester accumulation in coffee (*Coffea*) leaves: biological implications and uses. **Annals of Botany**, v. 110, p. 595-613, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/b700019g>.

CASTRO, J. M. da C. e; ANGELOTTI, F.; RITZINGER, C. H. S. P.; MAGALHÃES, E. E.; FERNANDES, H. A.; COSTA FILHO, J. H. da. População de nematoides de vida livre em ambiente enriquecido com CO<sub>2</sub>. In: SIMPÓSIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 3., 2011, Juazeiro. **Experiências para mitigação e adaptação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011. 1 CD-ROM. (Embrapa Semiárido. Documentos, 239).

CHAKRABORTY, S., NEWTON, A.C. Climate change, plant diseases and food security: an overview. **Plant Pathology**, v. 60, p. 2-14, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02411.x>.

CONCEIÇÃO, J. L. A.; ANGELOTTI, F.; PEIXOTO, A. R.; GHINI, R. Infection by *Xanthomonas campestris* pv. *viticola* under temperature increase and carbon dioxide concentrations. *Communicata Scientiae*, v. 8, n. 2, p. 214-220, 2017. DOI: <https://doi.org/10.14295/cs.v8i2.1779>.

COSTA, A. C. S.; DORNELES JUNIOR, J.; SANTOS, E. R. DOS; PRADO, S. de S. Impacto do dióxido de carbono em simbiontes do percevejo da soja, *Euschistus heros*. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12, 2018, Campinas. *Anais...* Campinas: Instituto Agrônomo, 2018. n° 18413, p. 1-8.

COSTA, L. B. Efeito da radiação ultravioleta-B sobre *Trichoderma* spp. e *Clonostachys rosea*, agentes de biocontrole de fitopatógenos. 2011. 80 f. Dissertação - (Mestrado em Fitopatologia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

COSTA, L. B., RANGEL, D., MORANDI, M., BETTIOL, W. Effects of UV-B radiation on the antagonistic ability of *Clonostachys rosea* to *Botrytis cinerea* on strawberry leaves. *Biological Control*, v. 65, p. 95-100, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2012.12.007>.

COSTA, L. B., RANGEL, D., MORANDI, M., BETTIOL, W. Impact of UV-B radiation on *Clonostachys rosea* germination and growth. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 28, p. 2497-504, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11274-012-1057-7>.

COSTA, L. B., RANGEL, D., MORANDI, M., STRICKER, S. M., BETTIOL, W. UV-B radiation reduces biocontrol ability of *Clonostachys rosea* against *Botrytis cinerea*. *Biocontrol Science and Technology*, v. 26, p. 1736-1749, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/09583157.2016.1241981>.

COSTA e CARVALHO, R. R.; WARWICK, D. R. N.; SOUZA, P. E.; CARVALHO FILHO, J. L. S. Efeito da temperatura no crescimento micelial, produção e germinação de esporos de *Thielaviopsis paradoxa* isolado de coqueiros em Sergipe. *Scientia Plena*, v. 7, n. 9, p. 1-5, 2011.

DaMATTA, F. M.; GODOY, A. G.; MENEZES-SILVA, P. E.; MARTINS, S. C. V.; SANGLARD, L. M. V. P.; MORAIS, L. E.; TORRE NETO, A.; GHINI, R. Sustained enhancement of photosynthesis in coffee trees grown under free-air CO<sub>2</sub> enrichment conditions: disentangling the contributions of stomatal, mesophyll, and biochemical limitations. *Journal of Experimental Botany*, v. 167, p. 341-352, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erv463>.

DaMATTA, F.M.; RAHN, E.; LÄDERACH, P.; GHINI, R.; RAMALHO, J.C. Why could the coffee crop endure climate change and global warming to a greater extent than previously estimated? *Climatic Change*, v. 152, p. 167-178, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2346-4>.

DORNELES JUNIOR, J. Desenvolvimento de *Euschistus heros* (Hemiptera: Pentatomidae) em ambiente enriquecido com CO<sub>2</sub>. 2017. 58 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Proteção de Plantas) - Faculdade de Ciências Agrônomicas da Unesp Campus Botucatu, Botucatu. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/150033>. Acesso em: 12 ago. 2021.

DORNELES JUNIOR, J.; ALMEIDA, G. R. DE; ZANOTTA, S.; DOLCEMASCOLLO, T. P.; PERREIRA, L. S.; APOLINÁRIO, M. L.; PRADO, S. de S. Levantamento populacional de cigarrinhas, potenciais vetoras de *Xylella fastidiosa*, sob condições de aumento de dióxido de carbono em plantas de café. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FITOPATOLOGIA, 49., 2016, Maceió. *Anais...* Maceió: Sociedade Brasileira de Fitopatologia, 2016. Ref. 632.

DORNELES JUNIOR, J.; PRADO, S. S. Influência da adição de CO<sub>2</sub> em plantas de *Glycine max* (L.) Merrill. In: SIMPOSIO DE ECOFISIOLOGIA APLICADA A AGRICULTURA, 1., 2015, Botucatu. **Anais...** Botucatu: Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, 2015.

DORNELES JUNIOR, J.; SOUZA, D. M. de; BARROS, L. S.; PRADO, S. de S.; BUENO, R. C. O. de F. Efeito do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico sobre ninfas de 1 instar de *Euchistus heros* (Fabr.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FITOSSANIDADE, 3., 2015, Águas de Lindóia. **Anais...** Águas de Lindóia: Unesp, 2015. p. 126-128.

FERNANDES, H. A.; ANGELOTTI, F.; PINHEIRO, G. S.; CALGARO, M.; GHINI, R.; TORRE NETO, A.; BARBOSA, L. G. Impacto do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico sobre a severidade da ferrugem em videira cv. sugraone In: WORKSHOP SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PROBLEMAS FITOSSANITÁRIOS, 2012, Jaguariúna. **Anais...** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2012.

FERREIRA, M. F. **Bactérias endofíticas em tecidos de cafeeiro sob diferentes concentrações de CO<sub>2</sub>**, 2017. 74 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Proteção de Plantas) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Campus Botucatu, Botucatu. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/151319>. Acesso em: 12 ago. 2021.

FERREIRA, R. B.; MORAES, J. C.; AUAD, A. M.; FONSECA, M. G. Interaction of spittlebug and forage grass under different carbon dioxide concentrations. **Journal of Pest Science**, v. 86, p. 161-166, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10340-012-0449-7>.

FIOLETOV, V.E.; BODEKER, G.E.; MILLER, A.J.; MCPETERS, R.D.; STOLARSKI R. Global and zonal total ozone variations estimated from ground-based and satellite measurements: 1964-2000. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. 1-14, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1029/2001JD001350>.

FLINT, S. D.; CALDWELL, M. M. Field testing of UV biological spectral weighting functions for higher plants. **Physiologia Plantarum**, v. 117, p. 145-153, 2003. DOI: <http://dx.doi.org/10.1034/j.1399-3054.2003.1170118.x>.

FONSECA, M. das G.; AUAD, A. M.; RESENDE, T. T. de; HOTT, M. C.; BORGES, C. A. V. How will *Mahanarva spectabilis* (Hemiptera: Cercopidae) respond to global warming? **Journal of Insect Science**, v. 16, n. 1, p. 1-6, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1093/jisesa/iiew005>.

FONSECA, M. das G.; SANTOS, D. R. dos; AUAD, A. M. Impact of different carbon dioxide concentrations in the olfactory response of *Sipha flava* (Hemiptera: Aphididae) and its predators. **Journal of Insect Behavior**, v. 27, p. 722-728, 2014. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s10905-014-9463-3>.

GALVÃO, J. A. H., BETTIOL, W. Effects of UV-B radiation on *Lecanicillium* spp., biological control agents of the coffee leaf rust pathogen. **Tropical Plant Pathology**, v. 39, p. 392-400, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1982-56762014000500006>.

GHINI, R. **Mudanças climáticas globais e doenças de plantas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2005. 109 p.

GHINI, R.; HAMADA, E. **Mudanças climáticas: impactos sobre doenças de plantas no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 331 p.

GHINI, R.; HAMADA, E., ANGELOTTI, F.; COSTA, L. B.; BETTIOL, W. Research approaches, adaptation strategies, and knowledge gaps concerning the impacts of climate change on plant diseases. **Tropical Plant Pathology**, v. 37, p. 5-24, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1982-56762012000100002>.

GHINI, R.; HAMADA, E., BETTIOL, W. Diseases in tropical and plantation crops as affected by climate changes: current knowledge and perspectives. **Plant Pathology**, v. 60, p. 122-132, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02403.x>.

GHINI, R.; MAC LEODB, R. E. O.; SANTOS, M. S.; SILVA, C. E. O. Elevated atmospheric carbon dioxide concentration increases eucalyptus plantlets growth and reduces diseases severity. **Procedia Environmental Sciences**, v. 29, p. 206-207, 2015a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.264>.

GHINI, R.; MAC LEOD, R. E. O.; TORRE NETO, A.; CARDOSO, D. C.; BETTIOL, W.; MORAIS, L. A. S. de; VIQUE, B. Increased atmospheric carbon dioxide concentration: effects on eucalypt rust (*Puccinia psidii*), C: N ratio and essential oils in eucalypt clonal plantlets. **Forest Pathology**, v. 44, n. 5, p. 409-416, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/efp.12117>.

GHINI, R.; TORRE NETO, A.; DENTZIEN, A. F. M.; GUERREIRO-FILHO, O.; IOST, R.; PATRÍCIO, F. R. A.; MARINHO-PRADO, J. S.; THOMAZIELLO, R. A.; BETTIOL, W.; DaMATTA, F. M. Coffee growth, pest and yield responses to free-air CO<sub>2</sub> enrichment. **Climatic Change**, v. 132, p. 307-320, 2015b. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-015-1422-2>.

GODIN-BEEKMANN, S. Spatial observation of the ozone layer. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 342, p. 339-348, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.10.012>.

GÓRIA, M. M.; GHINI, R.; BETTIOL, W. Efeito do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico sobre a incidência de *Pyricularia grisea* em sementes de arroz cultivado em estufas de topo aberto In: WORKSHOP SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PROBLEMAS FITOSSANITÁRIOS, 2012, Jaguariúna. **Anais... Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente**, 2012. 4 p.

GÓRIA, M. M.; GHINI, R.; BETTIOL, W. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration increases rice blast severity. **Tropical Plant Pathology**, v. 38, n. 3, p. 253-257, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1982-56762013005000010>.

GULLINO, M. L.; ALBAJES, R.; AL-JBOORY, I.; ANGELOTTI, F.; CHAKRABORTY, S.; GARRETT, K. A.; HURLEY, B. P.; JUROSZEK, P.; MAKKOUK, K.; PAN, X.; STEPHENSON, T. **Scientific review of the impact of climate change on plant pests: a global challenge to prevent and mitigate plant pest risks in agriculture, forestry and ecosystems**. Rome: FAO; International Plant Protection Convention; IPPC Secretariat, 2021. 72 p. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cb4777en/cb4777en.pdf>. Acesso em: 23 set. 2021.

GULLINO, M. L.; PUGLIESE, M.; GILARDI, G.; GARIBALDI, A. Effect of increased CO<sub>2</sub> and temperature on plant diseases: A critical appraisal of results obtained in studies carried out under controlled environment facilities. **Journal of Plant Pathology**, v. 100, p. 371-389, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s42161-018-0125-8>.

HAMADA, E.; GHINI, R. Metodologia de mapeamento para avaliação de impactos das mudanças climáticas sobre problemas fitossanitários. In: BETTIOL, W.; HAMADA, E.; ANGELOTTI, F.; AUAD, A. M.; GHINI, R. (ed.). **Aquecimento global e problemas fitossanitários**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 53-67.

- IOST, R. **Café arábica em experimento tipo FACE (“Free Air Carbon Dioxide Enrichment”): intensidade da ferrugem e do bicho-mineiro e crescimento da planta.** 2017. 81 f. Tese (Doutorado em Agronomia/ Proteção de Plantas) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Campus Botucatu, Botucatu. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/151156>. Acesso em: 12 ago. 2021.
- JABLONSKI, L. M.; WANG, X.; CURTIS, P. S. Plant reproduction under elevated CO<sub>2</sub> conditions: a meta-analysis of reports on 79 crop and wild species. *New Phytologist*, v. 156, p. 9-26, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00494.x>.
- JONES, R. R. Ozone depletion and its effects on human- populations. *British Journal of Dermatology*, v. 127, p. 2-6, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.1992.tb16980.x>.
- KUNZ, B. A.; CAHILL, D. M.; MOHR, P. G.; OSMOND, M. J.; VONARX, E. J. Plant responses to UV radiation and links to pathogen resistance. *International Review of Cytology*, v. 255, p. 1-40, 2006. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0074-7696\(06\)55001-6](https://doi.org/10.1016/S0074-7696(06)55001-6).
- LESSIN, R. C.; GHINI, R. Efeito do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico sobre o oídio e o crescimento de plantas de soja. *Tropical Plant Pathology*, v. 34, n. 6, p. 385-392, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1982-56762009000600004>.
- LESSIN, R. C.; GHINI, R. **Impacto do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico sobre a ferrugem asiática e o desenvolvimento de plantas de soja.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2011. 19 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa, 57).
- LONG, S. P.; AINSWORTH, E. A.; LEAKEY, A. D. B.; NÖSBERGERAND, J.; ORT, D. R. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO<sub>2</sub> concentrations. *Science*, v. 312, p. 1918-1921, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1114722>.
- MADRONICH, S.; MCKENZIE, R. L.; BJORN, L.O.; CALDWELL, M. M. Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *Journal of Photochemistry and Photobiology*, v. 46, p. 5-19, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1039/b700017k>.
- MAGALHÃES, E. E. de; ANGELOTTI, F.; FERNANDES, H. A.; PEIXOTO, A. R.; BARBOSA, L. G.; PINHEIRO, G. S. Severidade do oídio da videira em função do aumento da temperatura do ar. In: SIMPÓSIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 3., 2011, Juazeiro. **Experiências para mitigação e adaptação.** Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011. 1 CD-ROM. (Embrapa Semiárido. Documentos, 239).
- MAGALHÃES, S. T., FERNANDES, F. L., DEMUNER, A. J., PICANÇO, M. C.; GUEDES, R. N. C. Leaf alkaloids, phenolics, and coffee resistance to the leaf miner *Leucoptera coffeella* (Lepdoptera: Lyonetiidae). *Journal of Economic Entomology*, v. 103, p. 1438-1443, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1603/EC09362>.
- MANNING, W. J.; TIEDEMAN, A. V. Climate change: potential effects of increased atmospheric bon dioxide (CO<sub>2</sub>), ozone (O<sub>3</sub>), and ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. *Environmental Pollution*, v. 88, p. 219-245, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(95\)91446-R](https://doi.org/10.1016/0269-7491(95)91446-R).
- MIRANDA, T.M.; DORNELES JUNIOR, J.; PRADO, S. DE S. Impacto do aumento do CO<sub>2</sub> no percevejo marrom, *Euschistus heros*. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIÊNTEFICA, 9., 2015, Campinas. **Anais...** Campinas: IAC, 2015. 7 p.

NECHET, K. L.; HECK, D. W.; TERAQ, D.; HALFELD-VIEIRA, B. A. Effect of the increase of UV-B radiation on strawberry fruit quality. *Scientia Horticulturae*, v. 193, p. 7-12, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.06.044>.

NECHET, K. L.; VILELA, E. S. D.; HECK, D. W.; TERAQ, D.; HALFELD-VIEIRA, B. A. Effect of increased UV-B radiation on biological control of the gray mold by *Clonostachys rosea* and on the expression of strawberry defense-related enzymes. *Australasian Plant Pathology*, v. 46, n. 2, p. 107-113, 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s13313-017-0467-2>.

OLIVEIRA, E.; LANDAU, E.C. **Influência da temperatura nos sintomas causados pelo enfezamento pálido no milho**. Sete Lagoas-MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica; 151).

OLIVEIRA, S. A. de; SOUZA, B.; AUAD, A. M.; SILVA, D. M. da; SOUZA, L. S.; CARVALHO, C. A. de. Desenvolvimento e Reprodução de *Sipha flava* (Forbes) (Hemiptera: Aphididae) em Diferentes Temperaturas. *Neotropical Entomology*, v. 38, n. 3, p. 311-316, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2009000300002>.

PAUL, N.D. Stratospheric ozone depletion, UV-B radiation and crop disease. *Environmental Pollution*, v. 108, p. 343-355, 2000. DOI: [https://dx.doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00213-4](https://dx.doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00213-4).

PINHEIRO, G. S.; FERNANDES, H. A.; ANGELOTTI, F.; BARBOSA, L. G.; BARROS, J. R. A.; CALGARO, M.; GHINI, R.; TORRE-NETO, A. Impacto do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na severidade do míldio da videira. In: WORKSHOP SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PROBLEMAS FITOSSANITÁRIOS, 2012, Jaguariúna. *Anais...* Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2012. 5 p.

PIRES, T. A.; SOUZA, V. C.; MARINHO-PRADO, J. S. Himenópteros parasitoides de bicho-mineiro (*Leucoptera coffeella*) em cafeeiros submetidos a aumento da concentração de dióxido de carbono. In: XXV Congresso Brasileiro de Entomologia, 2014, Goiânia - GO. Entomologia integrada à sociedade para o desenvolvimento sustentável. *Anais...* Goiânia: Sociedade Entomológica do Brasil; Embrapa Arroz e Feijão, 2014a.

PIRES, T. A.; SOUZA, V. C.; MARINHO-PRADO, J. S. Infestação por moscas-das-frutas e parasitismo em frutos de café sob altas concentrações de dióxido de carbono. In: RAIB: Reunião Anual do Instituto Biológico, 27, 2014, São Paulo. *O Biológico*, v. 76. p. 134-134, 2014b. Disponível em: [http://www.biologico.sp.gov.br/uploads/docs/bio/v76\\_2/p134.pdf](http://www.biologico.sp.gov.br/uploads/docs/bio/v76_2/p134.pdf). Acesso em: 30 jul. 2021.

PRADO, S. de S. Impacto da temperatura na manutenção dos simbiontes associados aos cecos gástricos de percevejos. In: WORKSHOP SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PROBLEMAS FITOSSANITÁRIOS, 2012, Jaguariúna. *Anais...* Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2012.

PRADO, S. de S.; CORREA, D.P.; LOPES, J. R. S. Impacto do aumento de CO<sub>2</sub> sobre populações do complexo de cigarrinhas presente em cafeeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENTOMOLOGIA, 25, 2014, Goiânia. Entomologia integrada à sociedade para o desenvolvimento sustentável. *Anais...* Goiânia: Sociedade Entomológica do Brasil; Embrapa Arroz e Feijão, 2014.

RAKOCEVIC, M.; BATISTA, E. R.; PAZIANOTTO, R. A.; SCHOLZ, M. B. S.; SOUZA, G. A.; CAMPOSTRINI, E.; RAMALHO, J. C. Leaf gas exchange and bean quality fluctuations over the whole canopy vertical profile of Arabic coffee cultivated under elevated CO<sub>2</sub>. *Functional Plant Biology*, v. 48, p. 469-482, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1071/FP20298>.

RAKOCEVIC, M., MALAGODI-BRAGA, K. S.; BATISTA, E. R.; MAIA, A. H. N.; SCHOLZ, M. B. S.; FILIZOLA, H. F. The vegetative growth assists to reproductive responses of Arabic coffee trees in a long-term FACE experiment. *Plant Growth Regulation*, v. 91, p. 305–316, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s10725-020-00607-2>.

RAKOCEVIC, M.; RIBEIRO, R.V.; MARCHORI, P.E.R.; FILIZOLA, H.F.; BATISTA, E.R. Structural and functional changes in coffee trees after 4 years under free air CO<sub>2</sub> enrichment. *Annals of Botany*, v. 21, p. 1065–1078, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.1093/aob/mcy011>.

RICALDE, M. P.; NAVA, D.E.; LOECK, A. E.; DONATTI, M. G. Temperature-dependent development and survival of Brazilian populations of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitis capitata*, from tropical, subtropical and temperate regions. *Journal of Insect Science*, v. 12, n. 33, p. 1–11, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1673/031.012.3301>.

RODRIGUES, D. R.; ANGELOTTI, F.; PINHEIRO, G. S.; GHINI, R.; FERNANDES, H. A. Impacto do aumento da concentração de dióxido de carbono sobre o oídio da videira. In: WORKSHOP SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PROBLEMAS FITOSSANITÁRIOS, 2012, Jaguariúna. *Anais... Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente*, 2012.

SANTANA, C. V. da S. *Interação entre fatores do ambiente e Oidium sp. em feijão-caupi*. 2013. 69 f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Agrárias, Areia.

SANTANA, C. V. da S.; ANGELOTTI, F.; NASCIMENTO, L. C.; RODRIGUES, D. R.; PINHEIRO, G. S.; FERNANDES, H. A.; PEIXOTO, A. R.; COSTA, N. D. Impacto do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> sobre o oídio em feijão-caupi. In: WORKSHOP SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PROBLEMAS FITOSSANITÁRIOS, 2012, Jaguariúna. *Mudanças climáticas e problemas fitossanitários: Anais... Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente*, 2012.

SANTOS, J. de O.; ANGELOTTI, F.; COSTA-LIMA, T. C. da. Does elevated CO<sub>2</sub> affect the biological aspects of *Liriomyza sativae* in melon plants? *Semina: ciências agrárias*, v. 42, p. 2151–2162, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n4p2151>.

SANTOS, M. de S. *Efeito do CO<sub>2</sub> sobre a qualidade nutricional, ferrugem e fusariose da alfafa*. 2015. 55 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Proteção de Plantas) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Campus Botucatu, Botucatu. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/126398?show=full>. Acesso em: 30 ago. 2021.

SANTOS, M. de S.; GHINI, R. Severidade de ferrugem em alfafa em elevada concentração de CO<sub>2</sub> do ar. *Summa Phytopathologica*, n. 40, supl., 2014. Edição dos resumos do XXXVII Congresso Paulista de Fitopatologia, 2014, Botucatu. Doenças e Desafios da produção e qualidade na agricultura. Resumo 150.

SANTOS, M. de S. dos; GHINI, R.; FERNANDES, B. V.; SILVA, C. A. Increased carbon dioxide concentration in the air reduces the severity of *Ceratocystis* wilt in Eucalyptus clonal plantlets. *Australasian Plant Pathology*, v. 42, p. 592–599, 2013. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s13313-013-0223-1>.

SILVA, C. E. da; GHINI, R. Plant growth and leaf-spot severity on eucalypt at different CO<sub>2</sub> concentrations in the air. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 49, p. 232–235, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000300010>.

SILVA, D. M.; HOFFMANN-CAMPO, C. B.; BUENO, A. F.; BUENO, R. C. O. F.; OLIVEIRA, M. C. N.; MOSCARDI, F. Biological characteristics of *Anticarsia gemmatalis* (Lepidoptera: Noctuidae) for three consecutive generations under different temperatures: understanding the possible impact of global warming on a soybean pest. **Bulletin of Entomological Research**, v. 102, p. 285–292, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1017/S0007485311000642>.

SILVA, M. do C.; VÁRZEA, V.; GUERRA-GUIMARÃES, L.; AZINHEIRA, H.G.; FERNANDEZ, D.; PETITOT, A.-S.; BERTRAND, B.; LASHERMES, P.; NICOLE, M. Coffee resistance to the main diseases: leaf rust and coffee berry disease. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, p. 119–147, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100010>.

TORRE NETO, A.; GHINI, R. Rede de sensores sem fio para monitoramento e controle de processos em ambientes agrícolas. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. de M.; RESENDE, Á. V. de.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. de C. (ed.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 115–119.

TORRE NETO, A.; SILVA, D. M. D. D. da; CORRÊA, R. R. M.; GHINI, R. Rede de sensores sem fio na implementação de experimento “FACE” para estudos do impacto das mudanças climáticas na agricultura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 17., 2011, Guarapari. **Riscos climáticos e cenários agrícolas futuros: anais**. Guarapari: Incaper, 2011. 1 CD ROM.

TOZZI, F. R. O.; GHINI, R. Impacto do aumento da concentração atmosférica do dióxido de carbono sobre a ferrugem e o crescimento do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 8, p. 933–941, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000800005>.

UNITED NATIONS. **The sustainable development goals report 2020**. 68 p.

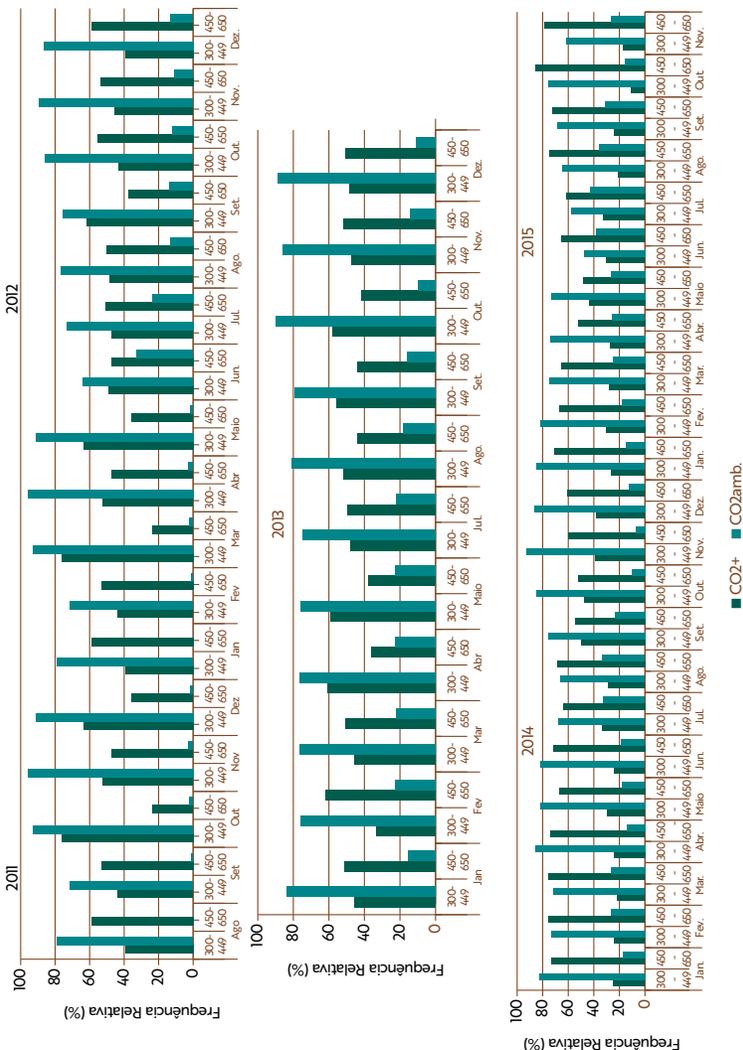
WATANABE, S., SUDO, K., NAGASHIMA, T., TAKEMURA, T., KAWASE, H., NOZAWA, T. Future projections of surface UV-B in a changing climate. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, D16118, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.1029/2011JD015749>.

WING, I. S.; De CIAN, E.; MISTRY, M. N. Global vulnerability of crop yields to climate change. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 109, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102462>.

WORKSHOP SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PROBLEMAS FITOSSANITÁRIOS, 2012, Jaguariúna. **Anais...Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente**, 2012. 1 CD ROM.

WU J.; GUAN, D.; YUAN, F.; ZHANG, X. Research advances on the biological effects of elevated ultraviolet-B radiation on terrestrial plants. **Journal of Forestry Research**, v. 20, p. 383–390, 2009. DOI: <https://dx.doi.org/10.1007/s11676-009-0066-3>.

**Apêndice A- Performance do experimento Climapest-FACE de 2011 a 2015, obtidos a partir dos valores em torno da concentração alvo de CO<sub>2</sub> (550±100 µmol.mol<sup>-1</sup>)**



**Figura 24.A.1.** Frequência relativa (%) dos valores de concentração de CO<sub>2</sub> em torno da concentração alvo (550±100 µmol.mol<sup>-1</sup>) dos tratamentos com aumento de concentração de CO<sub>2</sub> (+) 200 ppm acima da concentração de CO<sub>2</sub> do ambiente (CO<sub>2</sub> amb), do experimento Climapest-FACE de 2011 a 2015 obtidos a partir dos valores obtidos diariamente por 12 horas em intervalos de 15 segundos.

# MONITORAMENTO DOS FLUXOS DE GASES DO EFEITO ESTUFA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CANA-DE-AÇÚCAR: BALANÇOS E MODELAGEM

*Oswaldo Machado Rodrigues Cabral, Helber Custódio de Freitas, Santiago Vianna Cuadra e Humberto Ribeiro da Rocha*

## INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar no Brasil ocupa aproximadamente 16% da área agrícola e concentra-se nas Regiões Sudeste e Centro-Oeste (90%). As exportações de açúcar e o consumo de etanol representam 10% da economia agrícola do país (Soltangheisi et al., 2019). Aproximadamente 20% da produção agrícola global entre 2000 e 2018 foi de cana-de-açúcar, e o Brasil, que é o maior produtor da espécie, contribuiu com 39% da produção mundial em 2019. A rápida expansão das áreas de produção de cana-de-açúcar, as quais mais do que dobraram desde 2002, pode influenciar no uso de água, nas emissões de gases do efeito estufa, no balanço de carbono no solo, e contribuir com a mudança do clima (Zheng et al., 2022).

Em função dessas demandas, projetos de pesquisa da Embrapa Meio Ambiente e da Universidade de São Paulo foram realizados em áreas comerciais de cana-de-açúcar (com e sem queima), na Região Sudeste do Brasil (SP), com o objetivo de quantificar os fluxos de vapor de água e dos gases de efeito estufa (GEE), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), entre a superfície vegetada e a atmosfera. Os fluxos foram obtidos pelo método da covariância de vórtices (*eddy covariance*), utilizando-se sensores de absorção no infravermelho de caminho aberto e espectrômetro de absorção a laser de caminho fechado, ambos de resposta rápida (10 Hz). Esse método apresenta alta resolução temporal (30 minutos) e integração espacial da ordem de hectares em torno do ponto de observação. O conjunto de dados obtido foi utilizado na quantificação dos balanços de água e energia, assim como na determinação das trocas líquidas dos GEE, verificando-se ao longo do tempo se o agrossistema se comportou como fonte ou sumidouro com relação à atmosfera. Adicionalmente, modelos biogeoquímicos que simulam as trocas desses gases no sistema solo-planta-atmosfera

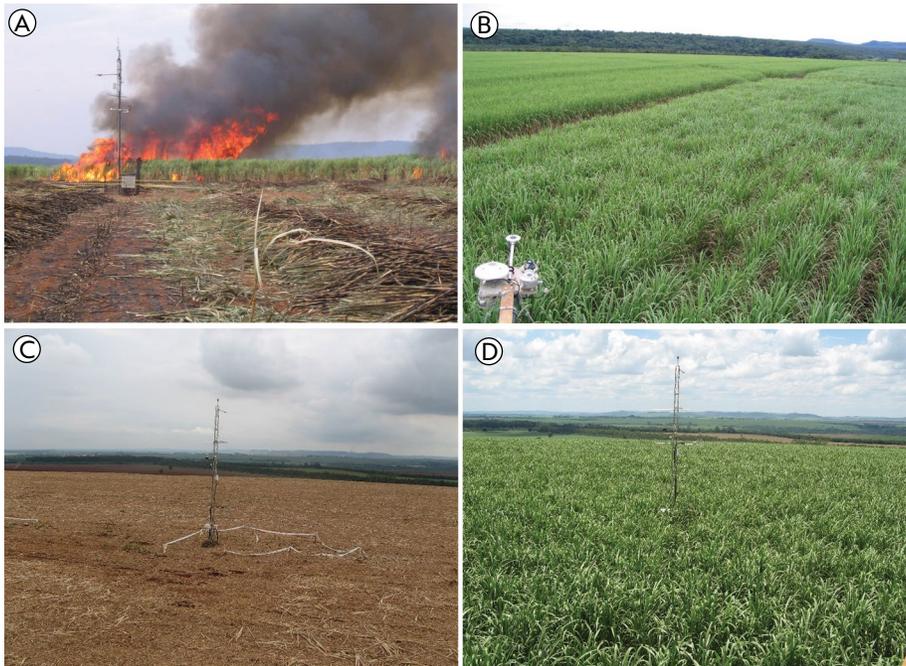
foram calibrados com as informações geradas, contribuindo para a compreensão da dinâmica dos processos envolvidos neste importante agrossistema, visando à determinação do potencial de medidas mitigadoras das mudanças climáticas e de contribuição das distintas formas de uso do solo e manejo quanto às emissões de GEE.

## ÁREAS DAS PLANTAÇÕES DE CANA-DE-AÇÚCAR

A área de cana-de-açúcar com colheita após a queima da palhada (variedade SP83-2847) possuía mais de 400 ha (USR, Figuras 25.1A, 25.1B) e localizava-se no município de Luiz Antonio, SP (21°38' S, 47°47' W, 552 m altitude), onde a precipitação anual média é de (1517 ± 274) mm. O solo é Latossolo vermelho amarelo arenoso (22% argila, 74% areia e 3% silte) e apresentava a densidade média de 1500 kg m<sup>-3</sup> da superfície até 2 m de profundidade. O conteúdo de água disponível (CAD), definido como a umidade do solo entre os potenciais de -0,01 e -1500 kPa, foi estimado em 136 mm para a camada de (0-1) m de solo. As observações (Cabral et al., 2012, 2013) foram realizadas durante a segunda rebrota (de 14 de abril de 2005 a 11 de maio de 2006) e a terceira rebrota (de 12 de maio de 2006 a 20 de maio de 2007), representando 393 e 374 dias de crescimento, respectivamente.

A área com cana colhida sem queima localizava-se em Pirassununga, SP (21° 57' S; 47° 20' W; altitude de 657 m), num talhão de 10,4 ha (FAYS, Figuras 25.1C, 25.1D). A região é caracterizada pela sazonalidade climática típica do bioma cerrado (da Rocha et al., 2009; Restrepo-Coupe et al., 2013; Cabral et al., 2015), com precipitação média anual de 1410 mm e temperatura média anual de 22°C. O solo Latossolo vermelho distroférico argiloso (65% argila, 21% areia e 14% silte) apresentava densidade de 1521 kg m<sup>-3</sup> na camada superficial de 0,4 m e 1300 kg m<sup>-3</sup> abaixo de 1m de profundidade. A CAD foi estimada em 341 mm para o primeiro metro de solo. A área foi reformada em outubro de 2015 (variedade IAC SP 95-5000). O final do primeiro ciclo (com a cana planta) teve duração de 389 dias e ocorreu no dia 303 de 2016 (29 de outubro); a colheita do segundo ciclo (soca, com duração de 304 dias) foi realizada em 30 de agosto de 2017 (dia 242) e a colheita da terceira soca ocorreu no dia 13 de novembro de 2018 (Cabral et al., 2020).

Nas duas áreas, os fluxos de H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> foram obtidos por meio de um sistema de correlação de vórtices (Cabral et al., 2012, 2013, 2020) composto de anemômetro sônico tridimensional e analisador de gás infravermelho.

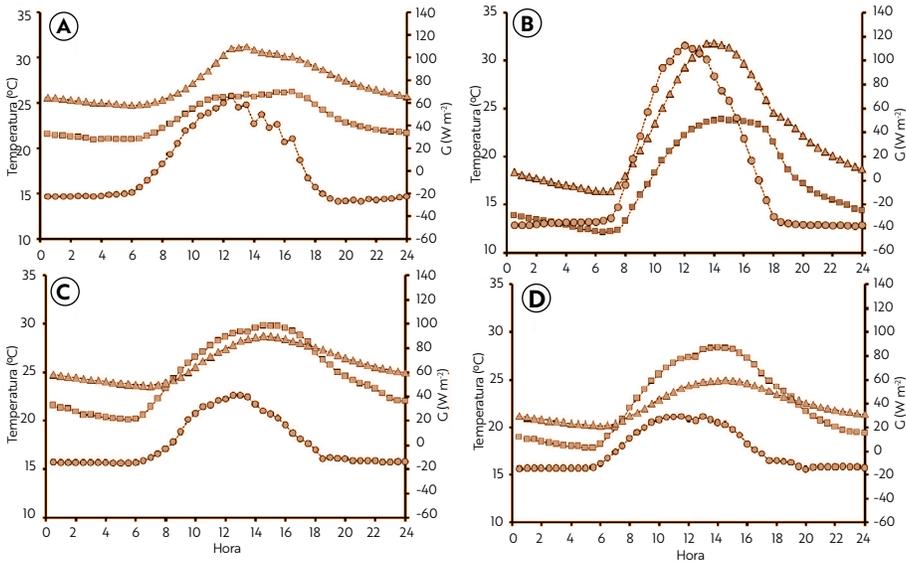


Fotos: Osvaldo Cabral

**Figura 25.1.** Plantação de cana-de açúcar na área USR: (A) na colheita com queima e corte manual; (B) durante o máximo desenvolvimento; na área da FAYS: (C) após a colheita sem a remoção da palha; e (D) durante o máximo desenvolvimento.

## OS EFEITOS DA PALHADA SOBRE O SOLO NA TEMPERATURA, NO FLUXO DE CALOR NO SOLO E NA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Em ambas as áreas, foram utilizados os valores médios de 30 minutos dos fluxos de calor no solo ( $G$ ), das temperaturas do solo em 5 cm ( $T_{\text{solo}}$ ) e do ar ( $T_{\text{ar}}$ ), observados durante dois períodos de 15 dias, para caracterizar os efeitos da presença e/ou ausência da palhada sobre o solo logo após a colheita e durante o máximo desenvolvimento da cana-de-açúcar. Na USR (colheita com queima de palhada), esses períodos foram entre os dias 104 e 120 de 2005 e 359 de 2005 até dia 8 de 2006. Na FAYS, entre os dias 304 e 320 de 2016 e 33 e 48 de 2017. A Figura 25.2 apresenta os resultados calculados para os referidos períodos.



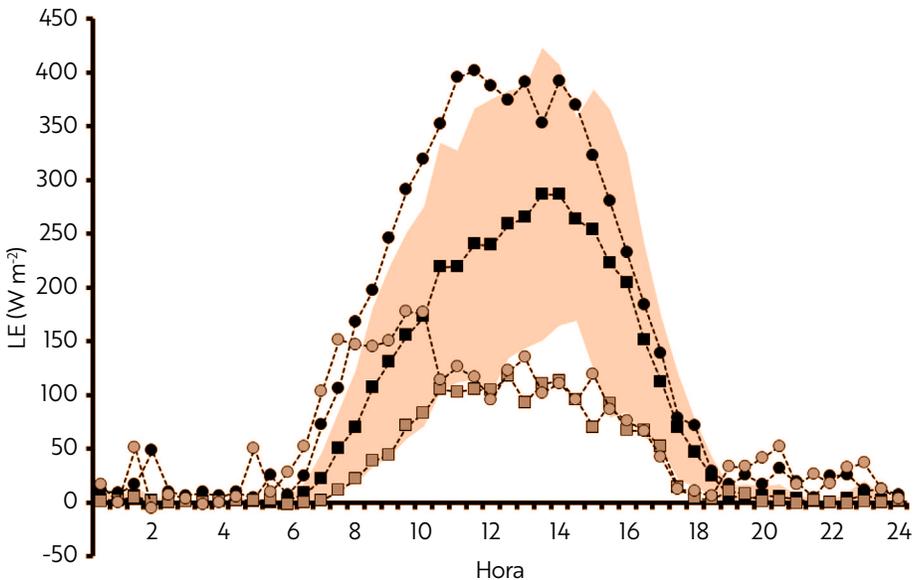
**Figura 25.2.** Valores médios das temperaturas do ar (Tar, quadrados) e do solo (Tsolo, triângulos), e do fluxo de calor no solo (G, círculos) observados nas plantações de cana-de-açúcar. Na área da USR: (A) após a colheita com queima; (B) durante o máximo desenvolvimento; e na área da FAYS: (C) após a colheita sem a remoção da palha; (D) durante o máximo desenvolvimento.

Após a colheita, na área com queima (USR, Figura 25.2A) a temperatura máxima do solo foi, em média, aproximadamente 100°C superior à temperatura do ar, e o fluxo de calor no solo apresentou valores próximos a  $120 \text{ W m}^{-2}$ . Na área em que a colheita ocorreu sem queima (FAYS), a quantidade de massa seca (MS) de palha depositada sobre o solo foi de  $16,7 \pm 1,7 \text{ ton MS ha}^{-1}$  e o padrão foi invertido (Figura 25.2C), de modo que a temperatura do ar foi maior do que a do solo em 30°C e o máximo valor de G foi aproximadamente 75% menor, atingindo  $30 \text{ W m}^{-2}$ . Durante o período de máximo desenvolvimento, as diferenças não foram significativas (Figuras 25.2B, 25.2D) devido à cobertura total do solo pelas plantas de cana-de-açúcar. Desta forma, os efeitos benéficos da manutenção total da palha, como o aumento na infiltração e armazenamento de água no solo (Ramos et al., 2016), seriam maiores no início da rebrota.

Os fluxos médios de 30 minutos do vapor de água (LE) são apresentados na Figura 25.3. Nos períodos após a colheita na USR, que apresentava o solo descoberto, os valores médios de LE foram menores até 10 horas da manhã. No período analisado na USR, entre os dias 104 e 120 de 2005, o total de precipitação foi de 63 mm. Já na FAYS, o total de precipitação foi 214 mm e ocorreu com maior frequência durante a noite

(entre os dias 304 e 320 de 2016). Portanto, apesar da camada de palha sobre o solo na FAYS, parte da precipitação foi retida e evaporada durante o período da manhã seguinte, o que explica a diferença observada nos comportamentos de LE entre 6 e 10 horas da manhã entre as duas áreas.

A evapotranspiração diária média (ET) foi calculada pela soma dos valores médios de 30 minutos de LE (Figura 25.3), multiplicados pelo calor latente de evaporação. A evapotranspiração durante os períodos de máximo desenvolvimento foi  $3,0 \pm 3,4$  mm dia<sup>-1</sup> na USR, com um índice de área foliar (IAF) de  $4,9$  m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>, e de  $4,8 \pm 3,3$  mm dia<sup>-1</sup> na FAYS, cujo IAF foi de  $4,4$  m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>. Entretanto, os desvios-padrão das médias de LE observadas na USR (área cinza da mesma figura) indicam que essas diferenças não foram significativas durante o intervalo inserido no período de máximo desenvolvimento.



**Figura 25.3.** Valores médios dos fluxos de calor latente (LE) observados na USR (quadrados) e FAYS (círculos) após a colheita (marrom) e durante o crescimento máximo (pretos) da plantação de cana-de-açúcar. A área hachurada em marrom indica o desvio-padrão das médias nas medidas de LE da USR durante o período de máximo desenvolvimento.

Com base nos valores da Tabela 25.1,  $66(\pm 11)\%$  da precipitação, em média, foi utilizada pela evapotranspiração (ET/P). A razão entre o peso fresco dos colmos (PFC) e a ET, que indica a eficiência da utilização de água, foi em média  $0,09 \pm 0,01$  ton ha<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>.

**Tabela 25.1.** Totais acumulados da precipitação (P), da evapotranspiração (ET) e dos pesos dos colmos observados nas colheitas (PFC) para cada ciclo nas áreas de cana-de-açúcar USR e FAYS.

Ciclos Dias	P mm	ET mm	PFC ton ha <sup>-1</sup>	ET/P	PFC/ET ton ha <sup>-1</sup> mm <sup>-1</sup>
USR					
393	1194	829	83 ± 6	0,69	0,10
374	1353	685	62 ± 4	0,51	0,09
FAYS					
367	1566	1148	99 ± 17	0,73	0,09
303	1466	855	82 ± 15	0,58	0,10
439	1261	959	78 ± 14	0,76	0,08

O conteúdo de água disponível (CAD) no primeiro metro do solo arenoso na USR foi estimado em 136 mm, inferior à ET média de 757 mm. Considerando a precipitação média (P) de 1274 mm, então houve um excedente de água infiltrada no solo ( $Exc = P - ET$ ) de 516 mm, correspondendo a cerca de 40% da precipitação que foi direcionada para a recarga de água no solo. Para o solo argiloso da FAYS, o CAD foi estimado em 341 mm, também inferior à ET média de 987 mm. Em termos médios, de maneira análoga à USR, houve recarga de 444 mm de água no solo, pois a precipitação média foi de 1431 mm. Em ambos os casos, a recarga de água seria suficiente para repor o armazenamento do primeiro metro de solo, considerando ausência de escoamentos superficiais.

## BALANÇOS DE CO<sub>2</sub>

O balanço de CO<sub>2</sub> em plantios agrícolas depende da fixação pela vegetação (produtividade primária) e da respiração das plantas e solo. O balanço entre esses dois termos corresponde ao saldo das trocas de CO<sub>2</sub> do sistema ( $NEE - Net Ecosystem Exchange$ ), cujo sinal indica se o sistema é uma fonte (NEE positivo) ou um sumidouro (NEE negativo) em relação à atmosfera. Dessa forma, os processos que potencialmente podem aumentar o sequestro ou emissão de carbono no solo são diretamente dependentes das práticas de manejo adotadas. Mesmo em cultivos voltados para a bioenergia, observa-se o aumento nas emissões de CO<sub>2</sub> caso os manejos do solo e cultura não sejam adequados. Embora se suponha que o balanço de carbono esteja em equilíbrio nos agrossistemas, tal simplificação do ciclo produtivo pode produzir resultados bem distintos da realidade.

Na FAYS, os valores médios de 30 minutos do balanço de CO<sub>2</sub> (NEE) nos períodos após a colheita (Figura 25.4) foram positivos, indicando que a respiração foi maior

do que a assimilação. Neste caso, a assimilação pode ser considerada como nula. Entretanto, na USR, os valores médios de NEE pós-colheita foram negativos durante o dia, provavelmente em decorrência da colheita manual e da ausência da palhada com relação à colheita mecânica (como na FAYS), o que favoreceu a rebrota mais rápida e a consequente assimilação de  $\text{CO}_2$ . Durante os períodos de máximo desenvolvimento, os valores de NEE foram similares, atingindo  $-37 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  em média.

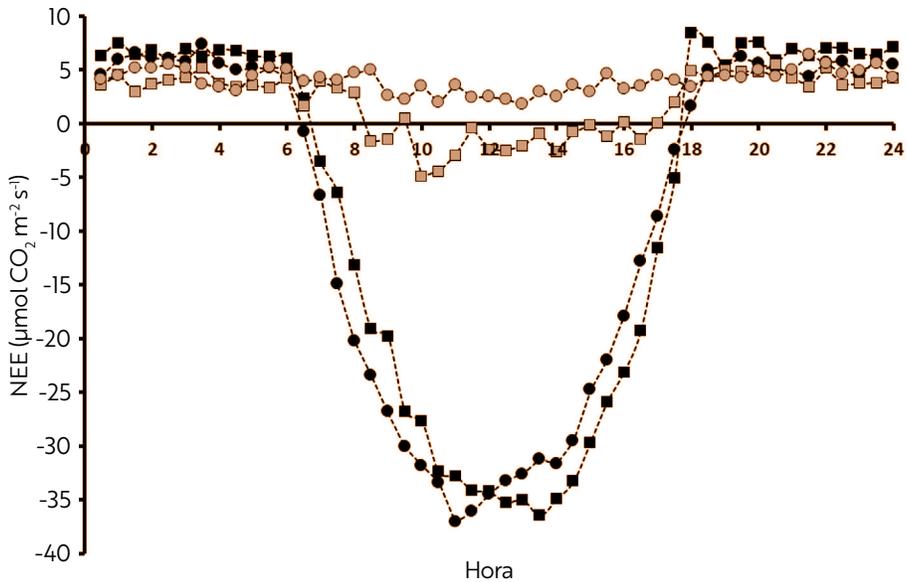


Figura 25.4. Valores médios dos fluxos de  $\text{CO}_2$  (NEE) observados na USR (quadrados) e FAYS (círculos) após a colheita (marrom) e durante o crescimento máximo (pretos) da plantação de cana-de-açúcar.

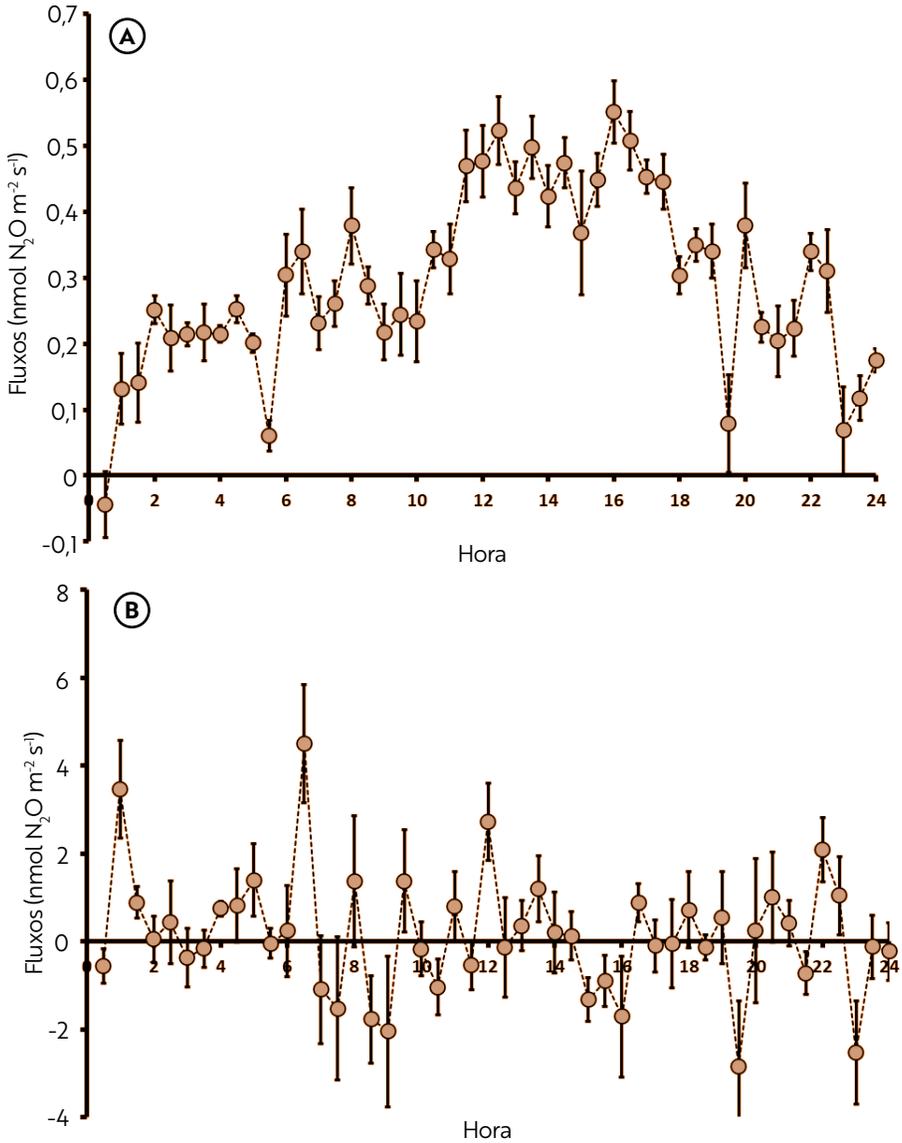
Os totais dos balanços de  $\text{CO}_2$  (NEE), assimilação bruta (GPP) e respiração do solo e planta (RE) são apresentados na Tabela 25.2. Na USR, os decréscimos de NEE e GPP observados no segundo ciclo ocorreram devido à limitação hídrica durante a rebrota, apesar da maior quantidade de chuva registrada durante o ciclo (Tabela 25.1). Na FAYS, a maior assimilação observada no primeiro ciclo deveu-se ao estabelecimento da nova plantação (cana planta) e sistema radicular.

**Tabela 25.2.** Totais acumulados dos balanços de CO<sub>2</sub> (NEE), da assimilação bruta (GPP) e de respiração do solo e planta (RE), em cada ciclo da plantação de cana-de-açúcar (± incertezas).

Ciclos Dias	NEE gCO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup>	GPP gCO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup>	RE gCO <sub>2</sub> m <sup>-2</sup>
USR			
1 – 393	-7201 ± 161	13244 ± 169	6043 ± 51
2 – 374	-3520 ± 235	9970 ± 304	6450 ± 194
FAYS			
1 – 367	-7345 ± 124	13657 ± 410	6312 ± 189
2 – 303	-4747 ± 119	11144 ± 334	6397 ± 192
3 – 439	-4475 ± 134	13516 ± 405	9041 ± 271

## BALANÇOS DE ÓXIDO NITROSO (N<sub>2</sub>O) E METANO (CH<sub>4</sub>) NA PLANTAÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Os fluxos de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> foram medidos na FAYS durante o segundo ciclo da plantação. A razão de mistura dos gases traço (CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O) foi obtida por meio de um espectrômetro de absorção a laser QCLAS (*Quantum Cascade Laser Absorption Spectrometer*, QCL-76-D, Aerodyne Research Inc., Billerica, MA, USA), equipado com um sistema de resfriamento (cooler, ThermoCube, USA) para a manutenção da temperatura do laser estável. O espectrômetro foi instalado num container metálico (2 x 2 x 2,3 m), que recebeu isolamento térmica interna e um ar condicionado (18000 BTU, Split-Inverter).



**Figura 25.5.** (A) Valores médios (30 min) dos fluxos de N<sub>2</sub>O observados na plantação de cana-de-açúcar da FAYS após a fertilização de nitrogênio (entre os dias 314 e 328 de 2016); (B) valores médios dos fluxos de CH<sub>4</sub> observados na FAYS entre os dias 1 e 15 de 2017. Barras verticais indicam o erro-padrão das médias (n=15).

Os valores médios de 30 minutos dos fluxos de  $N_2O$  (Figura 25.5A), observados após a adubação com fertilizante líquido ( $80 \text{ kg N ha}^{-1}$ , no dia 314 em 2016), variaram em torno de  $0,4 \text{ nmol } N_2O \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e indicaram o efeito do aumento da temperatura e umidade do solo na emissão deste gás. Já os fluxos médios de  $CH_4$  (Figura 25.5B) não apresentaram um padrão claro, alternando-se entre valores positivos e negativos. Aparentemente, o aumento da emissão ocorreu quando a umidade do solo decrescia, e não quando estava próxima da saturação (condição anaeróbica).

Os valores acumulados ao longo do segundo ciclo (303 dias) da plantação de cana-de-açúcar (Tabela 25.3) indicaram que o sistema solo-planta atuou como fonte dos gases  $CH_4$  e  $N_2O$ , embora eles tenham sido inferiores a 1% quando comparados com os balanços de  $CO_2$  (NEE na Tabela 25.2). Dessa forma, apesar da contribuição positiva (fonte) de 1% de  $N_2O$  e  $CH_4$ , em equivalência ao  $CO_2$ , o agrossistema comportou-se como sumidouro de carbono (valores negativos de NEE).

**Tabela 25.3.** Totais acumulados dos balanços de  $N_2O$  e  $CH_4$  ao longo do segundo ciclo da plantação de cana-de-açúcar FAYS ( $\pm$  representam as incertezas).

Período	$N_2O$	$CH_4$
305/2016-242/2017	$\text{g } N_2O \text{ CO}_2 \text{ eq. m}^{-2}$	$\text{g } CH_4 \text{ CO}_2 \text{ eq. m}^{-2}$
303 dias	$56,0 \pm 1,2$	$8,6 \pm 1,5$

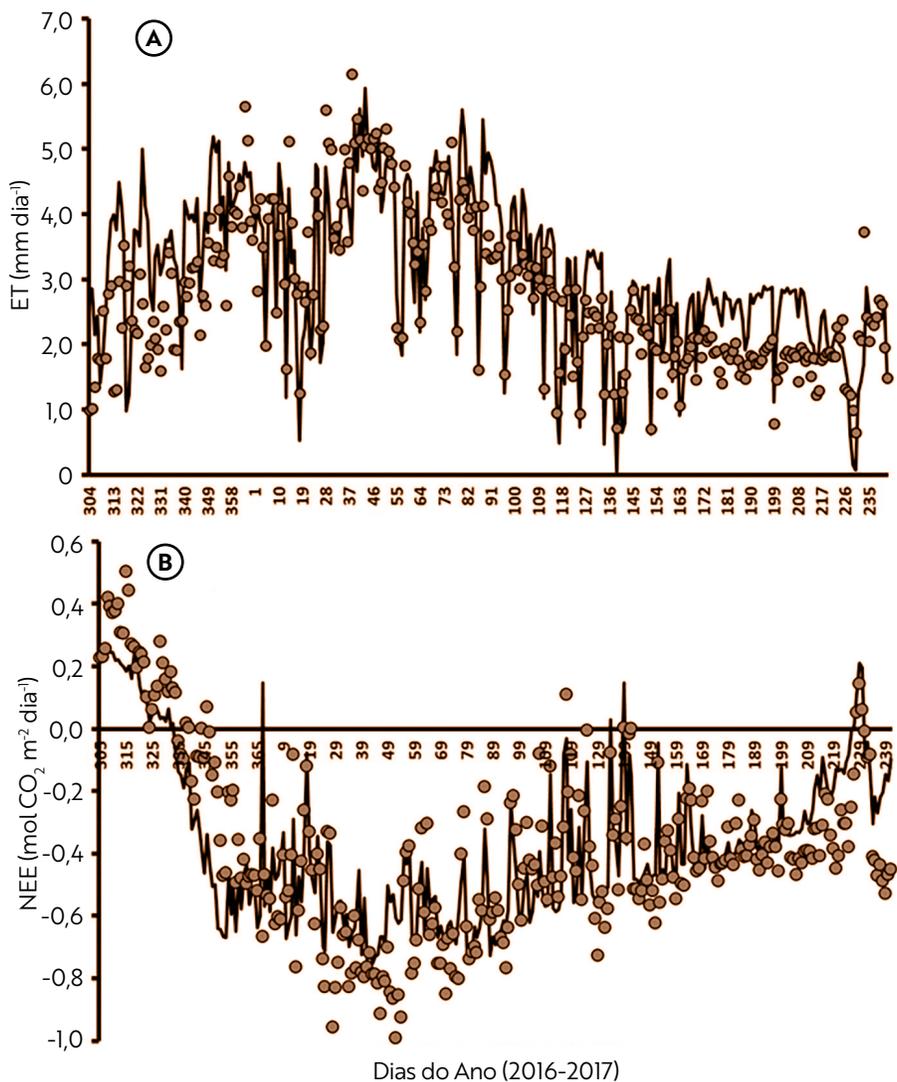
## Modelagem

Nos últimos anos tem havido um esforço crescente para representar explicitamente culturas agrícolas nos modelos biogeoquímicos dos ecossistemas terrestres, os *Agro-Land Surface Models* (Agro-LSMs) (Cuadra et al., 2012). O uso potencial dos Agro-LSMs na simulação da produtividade agrícola, dos impactos do uso da terra e do manejo das culturas nos recursos ambientais, como emissões e absorção de GEE, tem almejado a inclusão de diferentes agroecossistemas. Esses modelos utilizam representações biofísicas do sistema solo-planta-atmosfera, tais como as trocas de energia, água e momento entre o solo, a vegetação e a atmosfera; a fisiologia do dossel (fotossíntese, condutância estomática e respiração); balanço terrestre do carbono (produção primária líquida, respiração do solo, decomposição da matéria orgânica); fenologia de culturas agrícolas (emergência foliar e crescimento vegetativo, reprodutivo e senescência); transporte de soluto (i.e., dissolução do nitrogênio inorgânico fertilizado); e opções de manejo (aplicação de fertilizante, cultivo do solo, datas de plantio e colheita). Distintas abordagens têm sido usadas para incorporar diferentes tipos de culturas dentro dos Agro-LSMs – com tipos de culturas agrícolas variando de uma única variedade genérica de cultura à inclusão explícita de várias classes de culturas.

Com isso, a inerente flexibilidade de tais modelos tem levado à sua aplicação bem-sucedida em diferentes escalas, como: local, regional e global.

A modelagem biofísica tem sido utilizada na simulação dos fluxos ao longo dos ciclos de crescimento, com base nos horários observados de radiação solar global, precipitação, temperatura e umidade do ar, além das informações sobre o solo para a definição das funções hídricas. Para a cana-de-açúcar, o modelo Agro-IBIS foi calibrado com os fluxos obtidos na URU por Cuadra et al. (2012). Em continuidade, as simulações obtidas com a sua mais recente versão, o ECOSMOS (Benezoli et al., 2021), foram comparadas com os dados coletados na FAYS.

A evapotranspiração foi coerentemente simulada pelo modelo (Figura 25.6A). A principal divergência entre o modelo e os dados da realidade ocorre após a colheita, quando o modelo superestima o fluxo de calor latente. Esses desvios provavelmente estão associados ao fato de que, no modelo, a palhada tem impacto apenas no balanço de carbono, não influenciando o albedo da superfície e a resistência à troca de calor e vapor d'água entre o solo e a atmosfera. O fluxo de calor latente (LE) foi superestimado em  $0,5 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ , equivalente a  $0,2 \text{ mm dia}^{-1}$  de evapotranspiração (o fluxo de calor latente médio observado foi igual a  $7,43 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ , equivalente a  $3,03 \text{ mm dia}^{-1}$ ). A soma de ET simulado foi 951 mm, ou 11% acima do total, ao ser comparado com o segundo ciclo produtivo apresentado na Tabela 25.1. Os balanços de  $\text{CO}_2$  simulados são comparados aos observados na Figura 25.6B. O modelo foi capaz de reproduzir adequadamente os fluxos de  $\text{CO}_2$  e o total de NEE simulado ( $-4920 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}$ ), ou seja, 3% superior ao valor da Tabela 25.2.



**Figura 25.6.** Séries temporais de (A) evapotranspiração (ET) e (B) balanços de CO<sub>2</sub> (NEE), tanto as observadas (círculos) quanto as simuladas (linhas), todas relacionadas ao segundo ciclo da plantação de cana-de-açúcar da FAYS.

Embora ainda haja divergências com os dados concretos, os modelos de crescimento de culturas agrícolas têm sido amplamente utilizados como ferramentas para avaliação da produtividade e como auxílio do acompanhamento das safras agrícolas. Apesar de esses modelos estarem sendo constantemente aperfeiçoados, ainda não incluem alguns processos (simplificações) e utilizam outros tantos por meio de parametrizações genéricas (Cuadra et al., 2021).

Em outra abordagem, Xin et al. (2020) utilizaram o modelo de fotossíntese da vegetação (VPM) – baseado no conceito da eficiência do uso da radiação –, calibrado com dados observados na área da USR e índices de vegetação das imagens dos sensores MODIS (satélites Aqua e Terra), para o acompanhamento da fenologia. A assimilação bruta da plantação de cana-de-açúcar na USR foi estimada ao longo de 9 anos (entre 2000 e 2008), indicando a variabilidade do clima e o potencial quanto ao sequestro de carbono pela plantação ao longo do tempo.

Os modelos também têm sido utilizados para a compreensão das respostas da vegeta o aos cenários futuros promovidos pelas altera es do clima. Para a cana-de-açúcar, o modelo hidrodinâmico do ecossistema terrestre (SPA), após a calibra o baseada nos dados da USR, foi utilizado por Flack-Prain et al. (2021) na simula o de seis diferentes cenários de mudanç as climáticas entre os anos de 2015 e 2100. Os autores concluíram que haveria redu o da produtividade em São Paulo por conta do alto estresse hídrico que aumentaria a sensibilidade da cultura   temperatura, contrastando com outros estudos de modelagem que indicaram possível efeito positivo do aumento das temperaturas na produ o da cana-de-açúcar.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A observa o dos fluxos na escala da planta o propicia a estimativa dos balanços de água e CO<sub>2</sub>, possibilitando a caracteriza o do agroecossistema como fonte ou sumidouro em rela o   atmosfera. Além disso, a base de dados gerada pelas medi es de campo permite a avalia o comparativa com os resultados dos modelos que representam os ecossistemas agrícolas analisados, contribuindo para a determina o dos efeitos das altera es na cobertura e uso do solo, no manejo das culturas e no desenvolvimento de cenários relacionados a mudanç as climáticas.

## REFERÊNCIAS

- BENEZOLI, V.H., IMBUZEIRO, H.M.A., CUADRA, S.V., COLMANETTI, M.A.A., de ARAÚJO, A.C., STIEGLER, C., MOTOIKE, S.Y. Modeling oil palm crop for Brazilian climate conditions. *Agricultural Systems*, v. 190, article 103130, 2021.
- CABRAL, O.M.; ROCHA, H.R.; GASH, J.H.; LIGO, M.A.; TATSCH, J.D.; FREITAS, H.C.; BRASÍLIO, E. Water use in a sugarcane plantation. *Global Change Biology. Bioenergy*, v. 4, n. 5, p. 555-565, 2012.
- CABRAL, O.M.; ROCHA, H.R.; GASH, J.H.; LIGO, M.A.; RAMOS, N.P.; PACKER, A.P.; BATISTA, E.R. Fluxes of CO<sub>2</sub> above a sugarcane plantation in Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 182-183, p. 54-66, 2013.
- CABRAL, O.M.R., da ROCHA, H.R., GASH, J.H., FREITAS, H.C., LIGO, M.A.V. Water and energy fluxes from a woodland savanna (cerrado) in southeast Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 4, part. B, p. 22-40, 2015.
- CABRAL, O.M.R., FREITAS, H.C., CUADRA, S.V., de ANDRADE, C.A., RAMOS, N.P., GRUTZMACHER, P., GALDOS, M., PACKER, A.P.C., da ROCHA, H.R., ROSSI, P. The sustainability of a sugarcane plantation in Brazil assessed by the eddy covariance fluxes of greenhouse gases. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 282-283, article 107864, 2020.
- CUADRA, S. V., COSTA, M. H., KUCHARIK, C. J., da ROCHA, H. R., TATSCH, J. D., INMAN-BAMBER, G., da ROCHA, R. P., LEITE, C. C., CABRAL, O. M. R. A biophysical model of sugarcane growth. *Global Change Biology. Bioenergy*, v. 4, n. 1, p. 36-48, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01105.x>.
- CUADRA, S.V., KIMBALL, B.A., BOOTE, K.J., SUYKER, A.E., PICKERING, N. Energy balance in the DSSAT-CSM-CROPGRO model. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 297, article 108241, 2021.
- FLACK-PRAIN, S., SHI, L., ZHU, P., da ROCHA, H.R., CABRAL, O., HU, S., WILLIAMS, M. The impact of climate change and climate extremes on sugarcane production. *Global Change Biology. Bioenergy*, v. 13, n. 3, p. 408-424, 2021.
- RAMOS, N.P., YAMAGUCHI, C.S., Pires, A.M.M., ROSSETTO, R., POSSENTI, R.A., PACKER, A.P., CABRAL, O.M.R., de Andrade, C.A., Decomposição de palha de cana-de-açúcar recolhida em diferentes níveis após a colheita mecânica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, n. 9, p. 1492-1500, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900048>.
- RESTREPO-COUBE, N., da ROCHA, H.R., HUTYRA, L.R., de ARAUJO, A.C., BORMA, L.S., CHRISTOFFERSEN, B., CABRAL, O.M.R., de CAMARGO, P.B., CARDOSO, F.L., da COSTA, A.C.L., FITZJARRALD, D.R., GOULDEN, M.L., KRUIJT, B., MAIA, J.M.F., MALHI, Y.S., MANZI, A.O., MILLER, S.D., NOBRE, A.D., von RANDOW, C., AREU SÁ, L.D., SAKAI, R.K., TOTA, J., WOFYSY, S.C., ZANCHI, F.B., SALESKA, S.R. What drives the seasonality of photosynthesis across the Amazon basin? A cross-site analysis of eddy flux tower measurements from the Brasil flux network. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 182-183, p. 128-144, Dec. 2013.
- ROCHA, H. R.; MANZI, A. O.; CABRAL, O. M. R.; MILLER, S. D.; GOULDEN, M. L.; SALESKA, S. R.; RESTREPO-COUBE, N.; WOFYSY, S. C.; BORMA, L. S.; ARTAXO, P.; VOURLITIS, G.; NOGUEIRA, J. S.; CARDOSO, F. L.; NOBRE, A. D.; KRUIJT, B.; FREITAS, H. C.; von RANDOW, C.; AGUIAR,

R. G.; MAIA, J. F. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. **Journal Geophysical Research: Biogeoscience**, v. 114, n. G1, article G00B12, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JG000640>.

SOLTANGHEISI, A., WITHERS, P.J.A., PAVINATO, P.S., CHERUBIN, M.R., ROSSETTO, R., DO CARMO, J.B., DA ROCHA, G.C., MARTINELLI, L.A. Improving phosphorus sustainability of sugarcane production in Brazil. **Global Change Biology. Bioenergy**, v. 11, n. 12, p. 1444-1455, 2019.

XIN, F., XIAO, X., CABRAL, O.M.R., WHITE, Jr., P.M., GUO, H., MA, J., LI, B., ZHAO, B. Understanding the Land Surface Phenology and Gross Primary Production of Sugarcane Plantations by Eddy Flux Measurements, MODIS Images, and Data-Driven Models. **Remote Sensing**, v. 12, n. 14, article 2186, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12142186>.

ZHENG, Y., LUCIANO, A.C.S., DONG, J., YUAN, W. High-resolution map of sugarcane cultivation in Brazil using a phenology-based method. **Earth System Science Data**, v. 14, n. 4, p. 2065-2080, 2022.



# INVENTÁRIOS DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) NA AGRICULTURA E PECUÁRIA

*Magda Aparecida de Lima, Rosana Faria Vieira, Alfredo José Barreto Luiz, Marcos Corrêa Neves e Ana Paula Contador Packer*

## INTRODUÇÃO

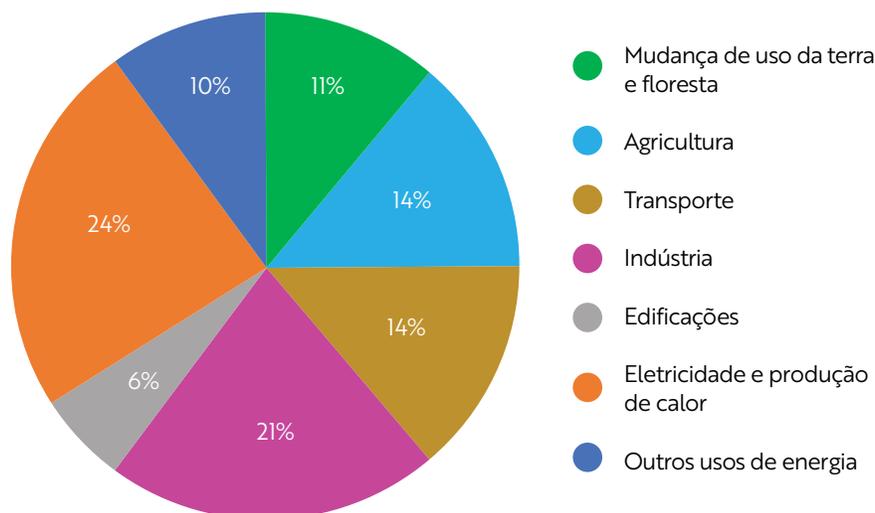
O Brasil foi um dos primeiros países a assinarem a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), resultado da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro, em junho de 1992, a qual foi ratificada pelo Congresso Nacional em 1994. Dentre os compromissos assumidos pelo país junto à esta Convenção está o de desenvolver e atualizar, periodicamente, inventários nacionais das emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros dos gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal, além de fornecer uma descrição geral das providências para implementar a Convenção. O documento que apresenta as estimativas de emissão e sumidouros de gases de efeito estufa, bem como sobre as políticas de governo endereçadas aos esforços de mitigação e de adaptação das atividades socioeconômicas nacionais é denominado de Comunicação Nacional. A Comunicação Nacional brasileira segue as diretrizes estabelecidas pela Decisão 10 da 2ª Conferência das Partes (COP) da UNFCCC (documento FCCC/CP/1996/15/Add.1, de 17 de julho de 1996). No Brasil, o então Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), hoje Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), foi incumbido de coordenar os trabalhos destinados à elaboração da Comunicação Nacional brasileira, envolvendo uma rede de instituições de pesquisa e outros órgãos, com recursos financeiros aportados pelo *Global Environmental Facility* (GEF), em português Fundo Global para o Meio Ambiente, programa implementado pelo Banco Mundial e pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) (Brasil, 2004). O Brasil apresentou até o presente (2021) quatro Comunicações Nacionais, cujos relatórios de referência sobre inventários de emissão de gases de efeito estufa estão disponíveis no site do Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE).

O primeiro inventário brasileiro de gases de efeito estufa foi elaborado em referência ao período de 1990 a 1994. Por ser o primeiro relatório preparado pelo país,

houve um esforço significativo para a organização e compilação de dados históricos, e na adoção de metodologias a serem seguidas para a elaboração das estimativas para os diferentes setores da economia, como energia, indústria, transporte, uso da terra, agropecuária e resíduos. À Embrapa coube apresentar estimativas de emissão de gases de efeito estufa para o setor agropecuário, a saber: 1- cultivo de arroz irrigado por inundação; 2- pecuária e sistema de tratamento de dejetos animais; 3- queima de resíduos agrícolas e 4- solos agrícolas. As atividades agrícolas constituem uma das principais fontes globais de emissão de gases de efeito estufa. Estima-se que 14% do potencial de aquecimento global (em inglês, *Global Warming Potential*) em um horizonte de 100 anos ( $PAG_{100}$ ) sejam devidos ao setor agrícola, excluída a fração correspondente às mudanças do uso da terra (Core Writing Team et al., 2014) (Figura 26.1). O metano e o óxido nitroso são os principais gases emitidos pelo setor agropecuário, com uma vida útil na atmosfera estimada em 12,4 e 121 anos, respectivamente (Core Writing Team et al., 2014).

O metano ( $CH_4$ ) é um gás com potencial de aquecimento global 28 vezes maior que o do  $CO_2$ , para um horizonte de 100 anos (Core Writing Team et al., 2014). O metano é um gás inodoro que permanece na atmosfera por um período de tempo relativamente pequeno, aproximadamente onze anos (Core Writing Team et al., 2014), mas com um potencial de aquecimento global 28 vezes maior que o do  $CO_2$ , para um horizonte de 100 anos (Core Writing Team et al., 2014). As concentrações de  $CH_4$  aumentaram, mundialmente, cerca 150% de 1950 até 2011, passando de níveis pré-industriais de 722 ppb para 1330 ppb (Myhre; Shindell, 2013). Contabiliza-se que as emissões antrópicas representam cerca de 50 a 65% das emissões totais desse gás (Myhre; Shindell, 2013). Grande parte das fontes de metano são biogênicas, dentre elas as várzeas, os campos de arroz inundados, a queima de biomassa, os animais ruminantes e sistemas de manejo de dejetos animais.

As estimativas globais de emissão de óxido nitroso ( $N_2O$ ) de origem antrópica indicam uma média de 7,3 Teragramas ( $Tg = 10^{12}$  gramas) N/ano entre 2007 e 2016 (Tian et al., 2020), sendo que os solos cultivados e os dejetos da pecuária juntos contribuem com cerca de 52% deste total. Estudos recentes apontam que a concentração de  $N_2O$  na atmosfera aumentou cerca de 20% em relação a níveis pré-industriais – de 270 partes por bilhão (ppb) em 1750 para 331 ppb em 2018, com um crescimento mais rápido observado nos últimos 50 anos devido às emissões derivadas de atividades humanas (Core Writing Team et al., 2014).



**Figura 26.1.** Contribuições às emissões globais de GEE por setores da economia, utilizando a métrica de GWP em um horizonte de 100 anos (Core Writing Team et al., 2014).

Como determina a Convenção do Clima, os inventários de emissão de gases de efeito estufa devem incluir apenas as emissões e remoções de gases de efeito estufa causadas por atividades humanas (antrópicas) (Brasil, 2004), conforme as diretrizes estabelecidas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima, em inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Para os inventários relativos ao setor agropecuário são consideradas as emissões dos seguintes gases: metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nítrico ( $\text{N}_2\text{O}$ ), o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), e óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ).

Metodologias destinadas à construção de inventários nacionais de gases de efeito estufa são apresentadas pelo IPCC, sendo progressivamente refinadas em função de periódicas atualizações científicas sobre o tema. A próxima seção abordará o uso destas metodologias.

## METODOLOGIA DO IPCC PARA A ELABORAÇÃO DE INVENTÁRIOS

O IPCC, por meio de suas diretrizes (*Guidelines*), recomenda metodologias de cálculo para a elaboração de inventários de emissões de gases de efeito estufa, cobrindo temas como energia, processos industriais, consumo de produtos, agricultura, florestas e outros usos do solo e resíduos. Estas diretrizes estabelecem diferentes níveis de

complexidade metodológica e de detalhamento das informações de entrada requeridas para a realização das estimativas de emissão de gases, que são chamados *Tiers* (camadas em inglês). Os *Guidelines* do IPCC classificam as abordagens metodológicas em três *Tiers*, sendo o *Tier 1* o método básico, que utiliza uma abordagem *top-down*, onde são utilizados fatores de emissão padrão (*default*) e dados pré-estabelecidos para os parâmetros associados à atividade. O *Tier 2* consiste no mesmo método do *Tier 1* mas com uso de fatores de emissão e outros parâmetros específicos ao país. O *Tier 3* é o nível mais complexo, geralmente empregando abordagens mais sofisticadas e modelagem. O IPCC recomenda que seja adotado o maior nível de complexidade possível pelo país e também fornece árvores de decisão específicas a cada categoria, com sugestão de métodos para todas as categorias. Para fontes de emissão que não sejam chaves no país, é recomendado que se utilize o *Tier 1*. Além disso, o IPCC disponibiliza um relatório complementar sobre boas práticas a serem utilizadas na elaboração de inventários nacionais (Penman et al., 2000), com informações mais detalhadas e complementares aos *Guidelines*.

## CONTRIBUIÇÃO AOS INVENTÁRIOS NACIONAIS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PELO SETOR AGROPECUÁRIO NO BRASIL

### Cultivo de Arroz irrigado por inundação

O metano é produzido durante a decomposição anaeróbia de substâncias orgânicas, mediante a ação de microrganismos do Domínio *Archae* (chamados de metanogênicos), sendo que a condição mais importante para a sua formação é a anaerobiose (ausência de oxigênio) que ocorre nos solos sob inundação. O arroz é uma planta semiaquática provida de aerênquima, tecido vascular que favorece a troca de gases entre as raízes e os tecidos acima da superfície da água, permitindo o transporte de  $O_2$  atmosférico para as raízes e de outros gases, como o  $CH_4$  produzido no solo anaeróbio (Neue, 1993).

O metano produzido nos arrozais é liberado para a atmosfera por várias rotas, sendo a principal delas por transporte difusivo pelo aerênquima. Segundo Bont et al. (1978), a presença de plantas de arroz facilita o escape de metano para a atmosfera na ordem de 7 a 10 vezes mais que em solos inundados sem cultivo de arroz. A formação de bolhas de gás na superfície da água e sua difusão na água do solo constituem outras vias de escape de metano a partir destes sistemas agrícolas.

Ao cultivo de arroz irrigado por inundação, atribui-se uma emissão anual global de 30 [24–40] Tg  $CH_4$  ano<sup>-1</sup> (Saunois et al., 2020) (Tg =  $10^{12}$  kg), correspondendo a cerca

de 8% do total de fontes antrópicas globais, estimadas em 380 Tg CH<sub>4</sub> para o ano de 2017 (Figura 26.2). No Brasil, estimou-se uma emissão de 331,1 Gigagramas (Gg = 109 gramas) de metano em 1990 e 398,5 Gg em 2016 proveniente do cultivo de arroz irrigado (Brasil, 202c) (Tabelas 26.1 e 26.2). Para os quatro inventários já realizados no país foram utilizados dados de fatores de emissão padrões (*default*) recomendados pelo IPCC, sendo que a partir do terceiro inventário, fatores de emissão específicos para os sistemas de produção utilizados no Estado do Rio Grande do Sul foram aplicados (Brasil, 2010). Como ponto de partida, no primeiro inventário foram realizados levantamentos de sistemas de produção em todos os estados brasileiros, com o apoio de instituições de pesquisa, associações de produtores, e bases de dados publicados.

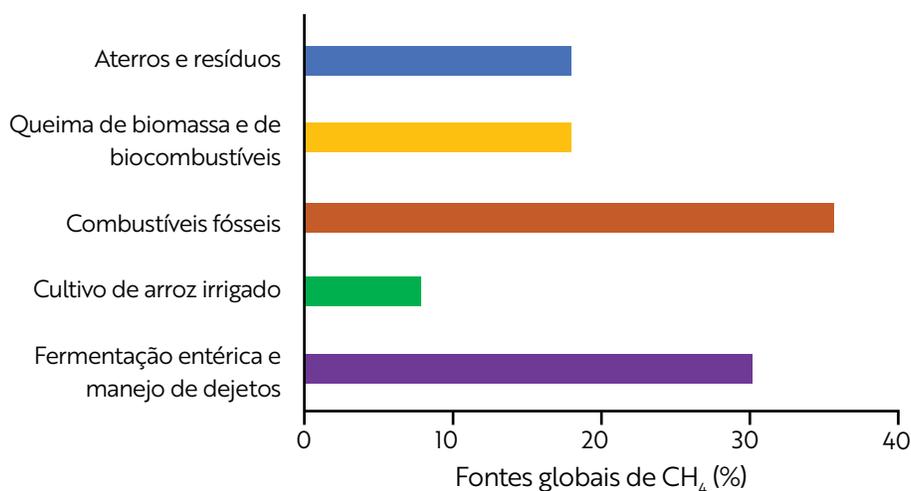


Figura 26.2. Fontes globais de metano de origem antrópica em 2017, estimadas por Saunois et al. (2020).

Tabela 26.1. Emissões de GEE pela agropecuária brasileira no ano de 1994.

GEE	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO	NO <sub>x</sub>
			Gg	
Total Brasil	15576,9	396,23	37933	2192
Total Agropecuária	11.947,0	306,62	1.753	65
- Fermentação entérica				
- Bovinos de corte	8631,9			
- Bovinos de leite	1.860,8			
- Ovinos	92,3			
- Suínos	35,1			
- Outros animais	288,7			
- Manejo de dejetos animais	594,1	9,77		
- Bovinos de corte	200,2	0,35		
- Bovinos de leite	69,5	3,08		
- Ovinos	3,1	-		
- Suínos	284,9	1,38		
- Outros animais	36,4	0,42		
- Emissões indiretas de N <sub>2</sub> O	-	4,54		
- Cultivo de arroz inundado	403,4	-		
- Solos agrícolas				
- Fertilizantes sintéticos		17,77		
- Adubos orgânicos		8,80		
- Deposição de dejetos em pastagem		143,36		
- Resíduos agrícolas		50,36		
- Mineralização de N associada a perda de C do solo		2,90		
- Manejo de solos orgânicos		5,47		
- Emissões indiretas				
- Deposição atmosférica		24,96		
- Lixiviação/Escurrimto superficial		40,20		
- Queima de resíduos	40,5	3,02	1753	65

**Tabela 26.2.** Emissões de GEE pela agropecuária brasileira no ano de 2016.

GEE	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO	NO <sub>x</sub>
	Gg			
Total Brasil	19333,2	586,09	24.044	2.548
Total Agropecuária	14.715,7	510,46	498	18
- Fermentação entérica				
- Bovinos de corte	11350,6			
- Bovinos de leite	1736,7			
- Ovinos	92,0			
- Suínos	39,9			
- Outros animais	243,3			
- Manejo de dejetos animais				
- Bovinos de corte	266,5	1,44		
- Bovinos de leite	152,8	3,23		
- Ovinos	3,4			
- Suínos	373,9			
- Outros animais	46,6			
- Emissões indiretas de N <sub>2</sub> O		7,85		
- Cultivo de arroz inundado	398,5			
- Solos agrícolas				
- Emissões diretas				
- Fertilizantes sintéticos		67,80		
- Adubos orgânicos		17,24		
- Deposição de dejetos em pastagem		186,83		
- Resíduos agrícolas		97,52		
- Mineralização de N associada a perda de C do solo		4,18		
- Manejo de solos orgânicos		6,40		
- Emissões indiretas				
- Deposição atmosférica		42,87		
- Lixiviação/Escurrimto superficial		70,92		
- Queima de resíduos	11,5	0,86	498	18

## Pecuária e manejo de dejetos animais

Herbívoros ruminantes, como bovinos, ovinos, bubalinos, muares e caprinos produzem metano por meio da fermentação entérica, um processo digestivo que ocorre no rúmen destes animais. A fermentação do material vegetal ingerido no rúmen é um processo anaeróbio efetuado pela população microbiana ruminal, em que os carboidratos celulósicos são convertidos em ácidos graxos de cadeia curta (ácido acético, ácido propiônico e butírico, principalmente), os quais são utilizados pelo animal como fonte de energia. Os microrganismos metanogênicos que estão presentes no rúmen obtêm energia para seu crescimento utilizando  $H_2$  para reduzir  $CO_2$  e formar metano, que é então eructado ou exalado para a atmosfera. As emissões globais de metano geradas por esta fonte mais o manejo de dejetos animais correspondem a cerca de 30% das emissões totais de metano geradas por fontes antrópicas (Saunois et al., 2020) (Figura 26.2). O Brasil possui o maior rebanho bovino mundial com fins comerciais, sendo que grande parte dos animais é do tipo zebuino, criados em sistemas predominantemente extensivos, de baixo investimento. Cerca de 91,5% das emissões de  $CH_4$  atribuídos ao setor agrícola provêm da pecuária, e deste percentual a grande parte provêm da pecuária bovina. Somado a outras fontes de metano, a evolução das emissões anuais de  $CH_4$  no Brasil é representada na Figura 26.3.

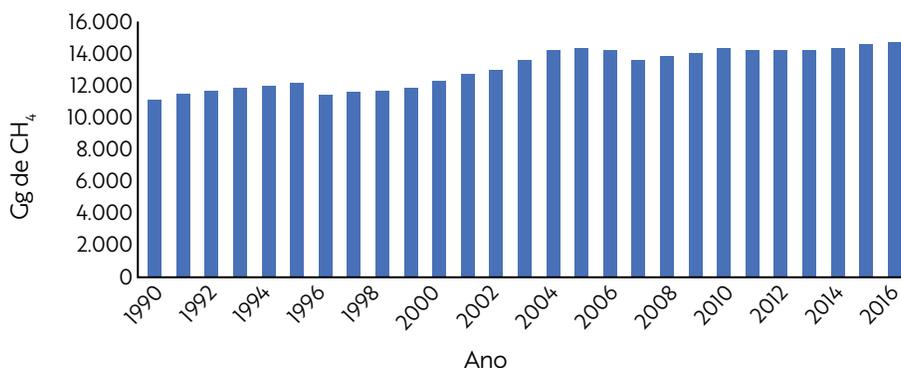


Figura 26 3. Evolução das emissões de  $CH_4$  provenientes da agropecuária no Brasil, de 1990 a 2016. Fonte: Brasil (2020d).

Para a elaboração dos inventários, um farto levantamento de dados foi originalmente realizado sobre as atividades de produção pecuária no país, abrangendo todas as categorias animais, com base em dados oficiais, incluindo IBGE e outras fontes de dados, e de literatura disponível. A metodologia do IPCC apresenta valores *default* de fatores de emissão de metano, obtidos a partir de dados de consumo de alimento, ener-

gia de manutenção, taxa de prenhez, e da taxa de sua conversão a metano, entre outros parâmetros, e que variam em função do sistema de produção e das características dos animais. Uma revisão profunda e atualizada sobre esses parâmetros foi realizada desde o primeiro relatório de referência, em função da literatura disponível e em consulta a especialistas nas áreas de conhecimento envolvidas. À época da elaboração do relatório de referência para a Segunda Comunicação Nacional, o IBGE estava realizando o Censo Agropecuário de 2006, com a inclusão de novas variáveis, para atender às diversas demandas apontadas pelo Conselho Consultivo do Censo, incluindo as da elaboração de inventários de emissão de gases. Entretanto, os resultados deste censo foram divulgados na fase final de elaboração daquele relatório de referência, embora tenha sido possível a utilização de dados sobre sistemas de manejo de dejetos existentes no país, tornados acessíveis pelo IBGE à equipe de elaboração do inventário.

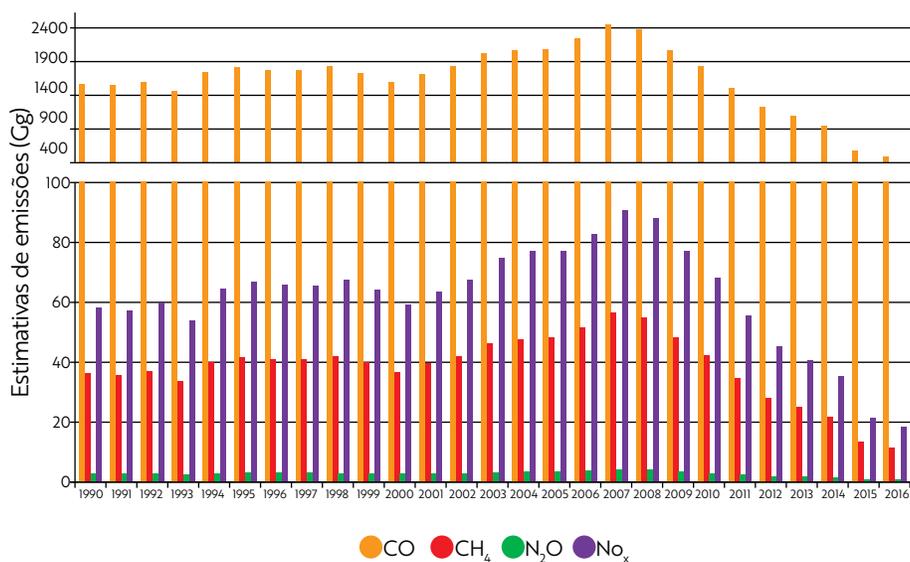
Em função da indisponibilidade de dados na literatura nacional sobre fatores de emissão de metano por fermentação entérica e de sistemas de manejo de dejetos, fatores de emissão de metano *default* recomendados pelos *Guidelines* do IPCC, de 2006 (Eggleston et al., 2006) foram utilizados para algumas categorias. A utilização do *Tier 2* foi empregada para a categoria de bovinos de corte e de leite, bem como para sistemas de manejo de dejetos de bovinos e de suínos. O mesmo procedimento foi aplicado nos relatórios seguintes, seguindo os *Guidelines* de 2006 e o IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories.

Em 2019, o IPCC publicou um refinamento dos *Guidelines* do IPCC de 2006 (Gavrilova et al., 2019) trazendo fatores de emissão *default* atualizados, à luz da literatura mundial mais recente. Para bovinos de leite, por exemplo, os valores médios de fatores de emissão podem variar de 93 a 138 kg de  $\text{CH}_4^{-1}$  animal<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> na América do Norte e em países do leste europeu, enquanto em países sul-americanos, estimam-se fatores de emissão entre 78 a 104 kg de  $\text{CH}_4^{-1}$  animal<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, em sistemas de baixa e alta produtividade, respectivamente (Gavrilova et al., 2019).

## Queima de resíduos agrícolas

Historicamente, o fogo sempre foi utilizado na agricultura para suprimir os resíduos agrícolas de lavouras e facilitar colheitas, além de combater pragas. A queima de resíduos agrícolas produz emissões de  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono), a qual não é considerada como uma emissão líquida, pois o  $\text{CO}_2$  emitido é reabsorvido pela cultura através da fotossíntese. Todavia, durante o processo de combustão, outros gases são produzidos, os quais têm suas taxas de emissões dependentes do tipo de biomassa e das condições da queima. Na combustão com chama são gerados os gases  $\text{N}_2\text{O}$  (óxido nitroso) e  $\text{NO}_x$  (óxidos de nitrogênio),  $\text{CH}_4$  (metano) e  $\text{CO}$  (monóxido de carbono) (Eggleston et al., 2006; Brasil, 2016 e 2020c).

O pico das emissões totais de gases de efeito estufa provenientes da queima de palha de cana-de-açúcar no Brasil ocorreu no ano de 2007, apresentando queda nos anos seguintes (Figura 26.4). Tal fato está associado à transição do sistema de colheita manual para mecanizada, a qual se intensificou no ano de 2007, decorrente principalmente de um acordo voluntário, firmado neste mesmo ano, por representantes do Estado de São Paulo e integrantes da indústria sucroalcooleira, no qual assinaram o *Protocolo Agroambiental do Setor Sucoenergético do Estado em São Paulo*, antecipando os prazos para a eliminação gradual da queima de cana-de-açúcar de 2021 para 2014 nas áreas mecanizáveis e de 2031 para 2017 nas áreas não mecanizáveis.



**Figura 26.4.** Evolução das emissões totais de GEE provenientes da queima de resíduos de cana-de-açúcar no Brasil de 1990 a 2016.

Embora a queima em cultivos de cana-de-açúcar ainda ocorra no Brasil, não há dados oficiais da proporção desta prática por área colhida. Contudo, o quinto volume do “Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar” (CONAB, 2018) apresenta o percentual de colheita mecanizada e manual, por regiões e estados, para os anos referentes ao período de 2007 a 2016 (Figura 26.5). Como a colheita manual é inviável sem a queima dos resíduos, a coleção de mapas com os dados da CONAB (2018) referentes à evolução do percentual da colheita de cana-de-açúcar realizada de modo manual está correlacionada diretamente com a porcentagem de área queimada nos estados (Garofalo et al., 2020).

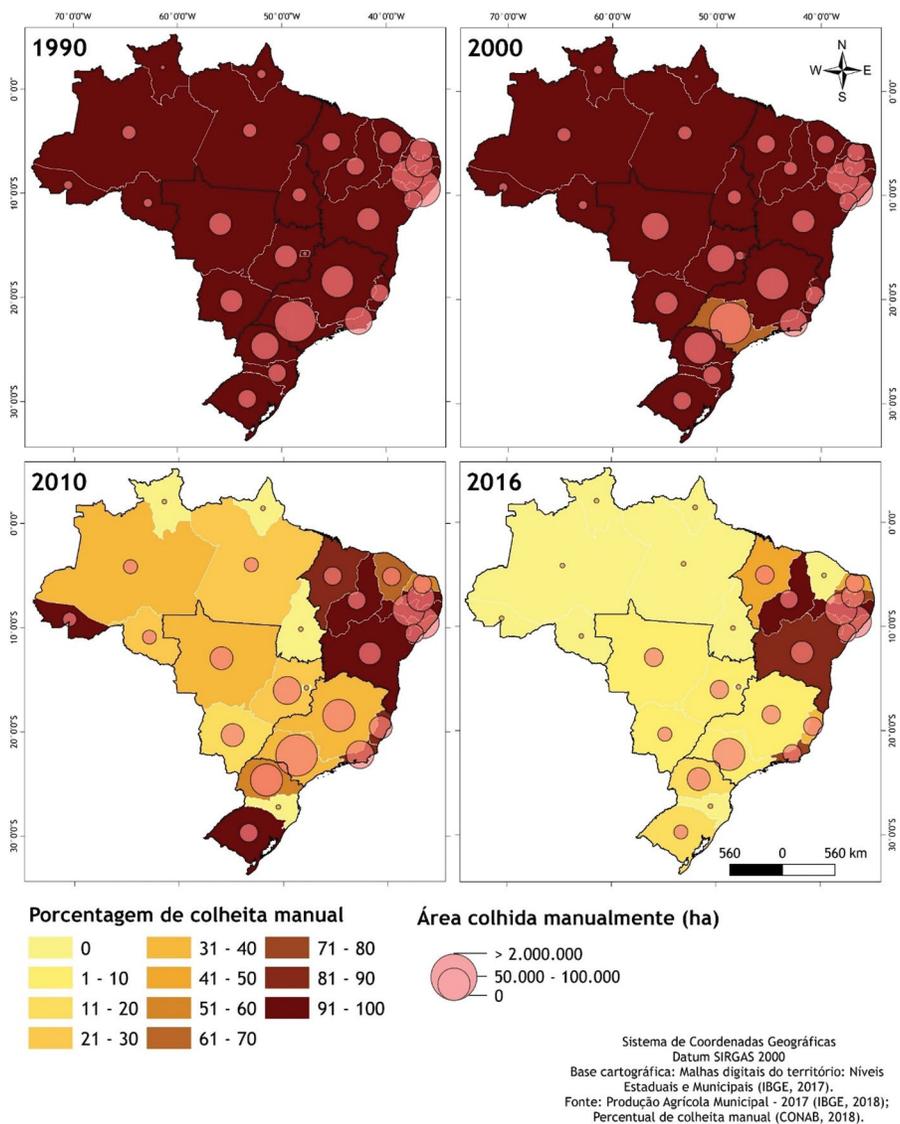
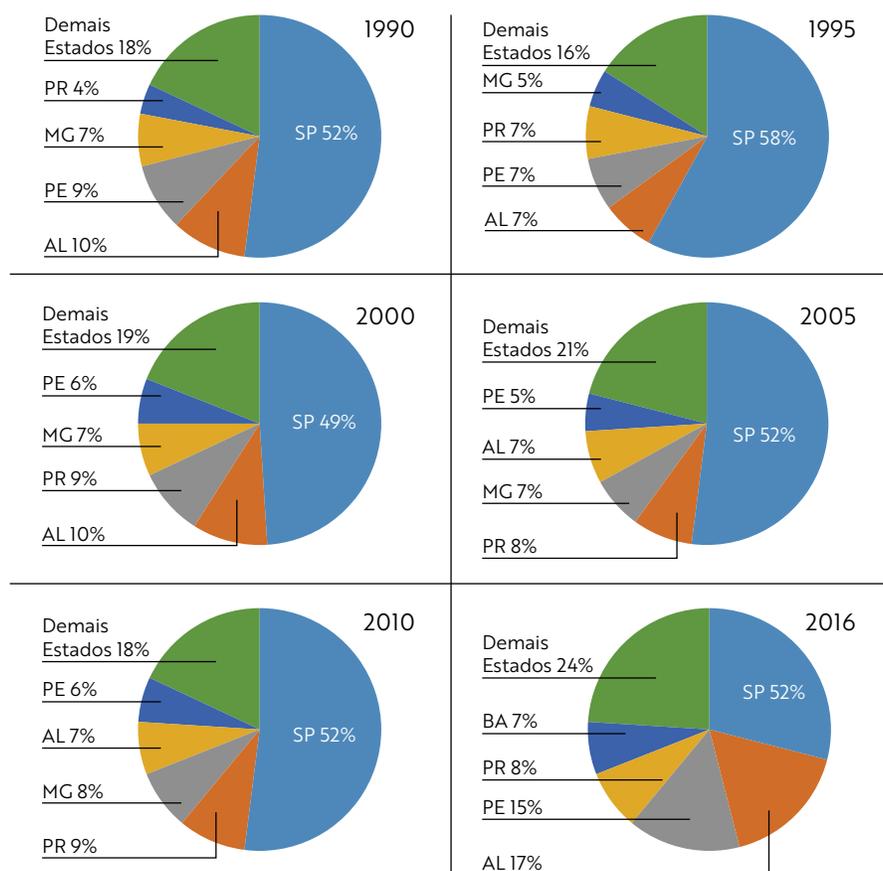


Figura 26.5. Mapeamento do percentual de colheita manual de cana-de-açúcar no Brasil, entre os anos de 1990 e 2016.

As estimativas estaduais destacam que as emissões do estado de São Paulo representaram até o ano de 2010, 50% das emissões nacionais (Figura 26.6). Já em 2016, devido a automatização da colheita da cana, as emissões do estado tiveram um decréscimo e corresponderam à 29% das emissões nacionais. Em contraste, as emissões dos estados Alagoas e Pernambuco começaram a ter maior representatividade nas emissões nacionais, passando de 9% e 8% em 1990, para 17% e 15% em 2016, respectivamente. Isso se deve ao fato da colheita manual representar na região nordeste, atualmente, 80% do sistema de colheita, e nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, maiores produtoras de cana-de-açúcar do país, menos de 5% (CONAB, 2018).

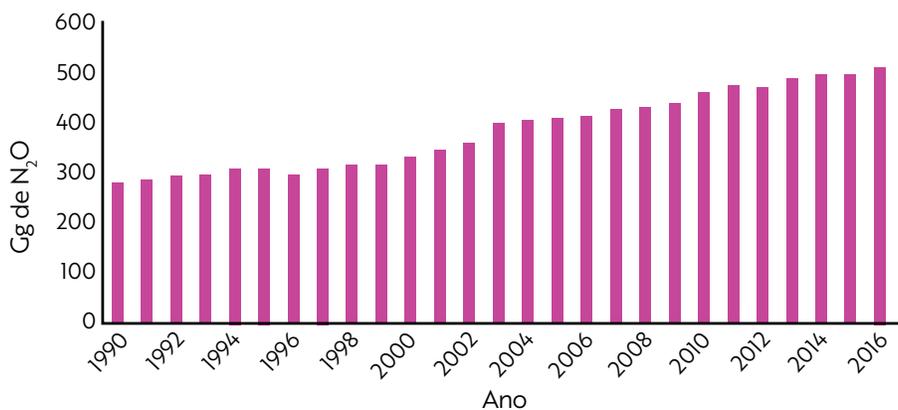


**Figura 26.6.** Contribuições estaduais nas emissões de GEE por queima de resíduos de cana-de-açúcar no Brasil para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 e 2016.

## Solos agrícolas

Dentre os GEE, o  $N_2O$  é o que possui maior importância para os sistemas agrícolas, uma vez que 70% das emissões globais deste gás se originam da dinâmica do N no solo (Ussiri et al., 2013). A crescente demanda por alimentos e rações animais tendem a impulsionar o aumento de suas emissões. Este gás é capaz de absorver a radiação infravermelha e retransmiti-la sob a forma de energia térmica com um potencial de aquecimento de 265 vezes maior do que o  $CO_2$  (Core Writing Team, 2014). Além disto, o óxido nitroso está relacionado com a depleção da camada de ozônio ( $O_3$ ) na estratosfera.

O  $N_2O$  é produzido durante os processos microbianos de desnitrificação e nitrificação. A nitrificação é o processo de oxidação do nitrogênio na forma de amônio para nitrato sendo mediado por bactérias quimiotróficas aeróbias. A desnitrificação é o processo de redução biológica do N-nitrato, ou N-nitrito, para  $N_2O$ , NO ou até mesmo  $N_2$ . Estes processos são influenciados por muitos fatores, como por exemplo, temperatura, umidade do solo, atividade microbiana e conteúdo de matéria orgânica. A agricultura contribui com as emissões de  $N_2O$  em razão de adições de fertilizantes nitrogenados sintéticos, da deposição de dejetos animais, do cultivo de solos orgânicos e minerais e por meio da mineralização da matéria orgânica. No Brasil, os dejetos animais depositados nos solos constituem uma das principais fontes de emissão direta de  $N_2O$ , com 143,36 Gg  $N_2O$  ano<sup>-1</sup> e 186,83 Gg  $N_2O$  ano<sup>-1</sup> em 1994 e 2016, respectivamente (Brasil, 2020c), conforme apresentado nas Tabelas 26.1 e 26.2. Somado a outras fontes de óxido nitroso, a evolução das emissões anuais de  $N_2O$  no Brasil é representada na Figura 26.7.



**Figura 26.7.** Evolução das emissões de  $N_2O$  provenientes de atividades antrópicas no Brasil, de 1990 a 2016. Fonte: Brasil (2020d).

Com base nos dados de relatórios de referência da 3ª. Comunicação Nacional, pode-se comparar os dados de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub> e CO provenientes dos setores da Agropecuária e da Mudança do uso da terra, de 1990 a 2010, como percentuais do total (Tabela 26.3). A agropecuária apresenta-se como a principal fonte de emissões de CH<sub>4</sub> e de N<sub>2</sub>O, enquanto a mudança de uso da terra contribui com maiores emissões de CO e de N<sub>2</sub>O.

**Tabela 26.3.** Percentual das emissões de GEE provenientes da agropecuária e mudança no uso da terra no Brasil nos anos de 1990, 1995, 2000, 2005 e 2010, com base nos dados da 3ª. Comunicação Nacional.

Anos	Agropecuária		Mudança no uso da terra		Total
	Gg	%	Gg	%	Gg
<b>CH<sub>4</sub></b>					
1990	9.185,6	76,6	1.041,5	8,7	11.993,7
1995	10.058,2	67,6	2.895,7	19,5	14.887,4
2000	10.382,3	70,4	2.048,8	13,9	14.740,8
2005	12.357,7	67,2	3.237,9	17,6	18.397,3
2010	12.415,6	74,4	1.135,5	6,8	16.688,2
<b>N<sub>2</sub>O</b>					
1990	303,5	80,6	42,56	11,3	376,33
1995	340,2	70,1	106,98	22,0	485,57
2000	355,9	73,6	81,96	16,9	483,70
2005	429,0	70,3	125,25	20,5	610,06
2010	472,1	84,2	47,08	8,4	560,49
<b>NO<sub>x</sub></b>					
1990	98,6	4,3	526,7	22,8	2.307,2
1995	109,9	3,3	1.196,0	35,8	3.336,6
2000	97,2	2,8	993,8	28,7	3.459,2
2005	126,2	3,1	1.470,3	36,1	4.068,1
2010	171,6	5,0	589,9	17,2	3.429,4
<b>CO</b>					
1990	3.627,6	11,1	8.429,4	56,6	32.550,4
1995	4.045,8	6,4	48.855,6	77,2	63.315,7
2000	3.576,4	7,4	35.879,9	74,1	48.427,8
2005	4.644,4	6,7	55.810,0	80,1	69.671,5
2010	6.313,5	18,0	20.231,4	57,7	35.050,4

## CONTRIBUIÇÃO AO PRIMEIRO INVENTÁRIO ESTADUAL DE EMISSÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA DIRETOS E INDIRETOS DO ESTADO DE SÃO PAULO

Como desdobramento ao compromisso do Brasil junto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, iniciativas estaduais surgiram também no país, no sentido de assegurar um maior engajamento dos governos estaduais na questão da mudança climática global, como foi o caso dos estados de São Paulo (Cetesb, 2011), Minas Gerais (Minas Gerais, 2008), Acre (Costa; Amaral, 2014), Amazonas (Amazonas, 2010), Bahia (Bahia, 2010), Rio de Janeiro (Rio de Janeiro, 2007), Rio Grande do Sul (FEPAM, 2010), entre outros.

A Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC) foi instituída pelo Governo do Estado de São Paulo em 2009, pela Lei no. 13.798 de 09 de novembro de 2009 (São Paulo, 2010), sendo regulamentada parcialmente pelo Decreto no. 55.947 de 24 de junho de 2010 (São Paulo, 2010). Ela tem por objetivo estabelecer o compromisso do Estado frente aos desafios das mudanças climáticas globais, bem como dispor sobre as condições para as adaptações necessárias aos impactos derivados das mudanças climáticas e contribuir para reduzir ou estabilizar a concentração de GEE na atmosfera. A Cetesb constitui o órgão responsável pela coordenação dos inventários de emissão de gases de efeito estufa no estado, contando com a participação de várias instituições para a elaboração de relatórios de referência. A Embrapa Meio Ambiente elaborou o relatório de Referência do Setor de Agropecuária como parte integrante do 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeitos Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo, coordenado pelo Programa Estadual de Mudanças Climáticas da Companhia Ambiental do estado de São Paulo - PROCLIMA/Cetesb com o apoio da Embaixada Britânica do Brasil. O relatório (Cetesb, 2015) apresenta estimativas de emissão de gases de efeito estufa com base nas metodologias de inventários do Revised 1996 IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (Houghton et al., 1996), e no documento *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories* (Penman et al, 2000) do Painel Intergovernamental de Mudança do Clima (IPCC). Os temas abordados no relatório foram cultivo de arroz irrigado por inundação, pecuária e manejo de dejetos animais, solos agrícolas e queima de resíduos agrícolas, para o período de 1990 a 2008. As estimativas de emissão de GEE geradas no primeiro inventário estadual para os anos de 1990 e 2008 são apresentadas na Tabela 26.4. De um total de 678 Gg de emissão de CH<sub>4</sub> estimadas para o setor agropecuário em 2008, que representou 59 % do total estadual, a fermentação entérica de ruminantes contribuiu com 622 Gg de CH<sub>4</sub>, o manejo de dejetos com 54,05 Gg, o cultivo de arroz inundado com 2,14 Gg, e a queima de resíduos agrícolas com

0,075 Gg. (Tabela 26.5). Os solos agrícolas contribuíram com emissões de 35,94 Gg de  $N_2O$ , representando 95 % do total estadual, sendo que 28,31 Gg foram atribuídas às emissões diretas de  $N_2O$  e 7,63 Gg às emissões indiretas. Sistemas de manejo de dejetos contribuíram com 1,86 Gg de  $N_2O$  e a queima de resíduos da cana-de-açúcar com 0,004 Gg de  $N_2O$ .

**Tabela 26.4.** Estimativa de emissão de  $CH_4$ ,  $N_2O$ , CO e  $N_2O$  provenientes da agropecuária no Estado de São Paulo em 1990 e 2008 (Cetesb, 2011).

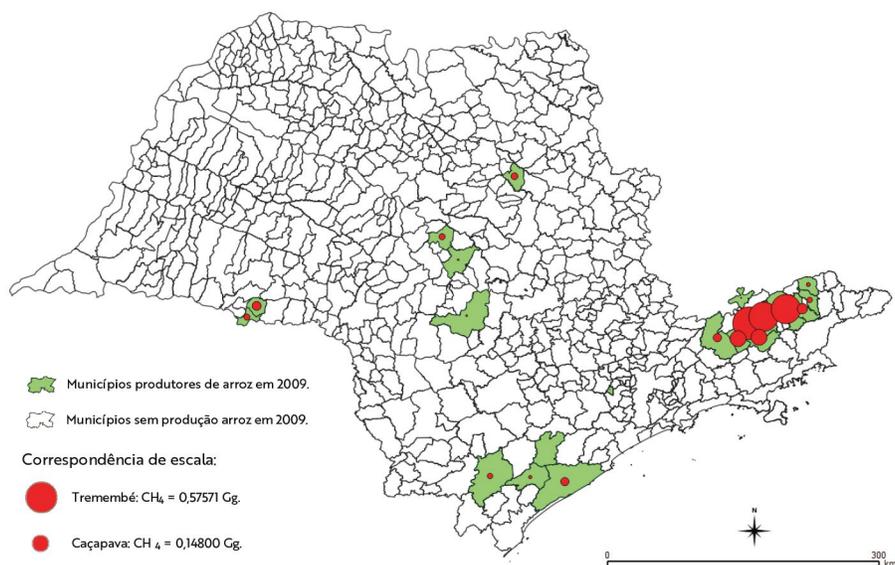
Ano	$CH_4$	$N_2O$	CO	$NO_x$
1990	734	31	1,6	0,1
2008	678	38	1,3	0,1

**Tabela 26.5.** Estimativa de emissão de  $CH_4$ ,  $N_2O$ , CO e  $N_2O$  provenientes de fontes agropecuárias no Estado de São Paulo em 1990 e 2008 (Cetesb, 2011).

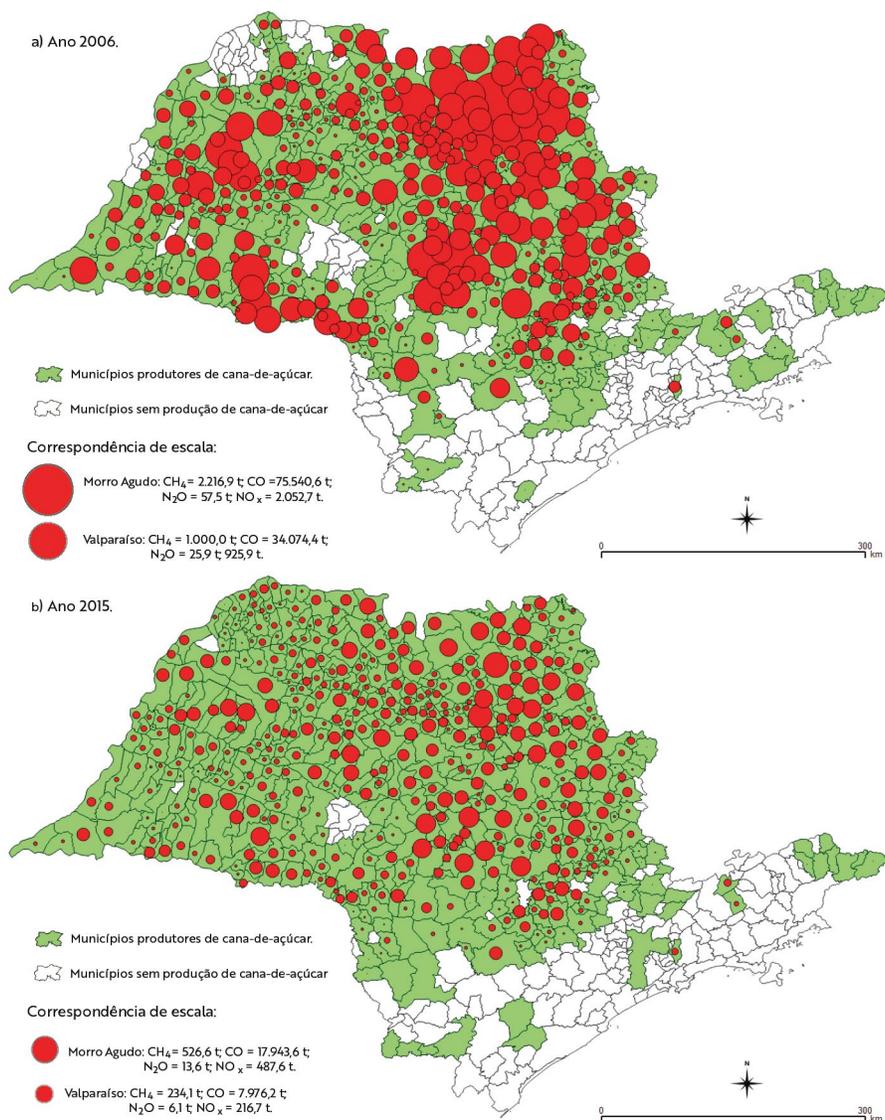
	1990	2008
	Gg	
	$CH_4$	
Fermentação entérica	689	622
Manejo de dejetos	42,61	54,05
Cultivo de arroz inundado	1,60	2,14
Queima de resíduos agrícolas	0,061	0,075
	$N_2O$	
Queima de resíduos agrícolas	0,003	0,004
Manejo de dejetos animais	0,956	1,863
Emissões diretas	21,68	28,31
Emissões indiretas	8,12	7,63
	$NO_x$	
Queima de resíduos agrícolas	1,3	1,6
	CO	
Queima de resíduos agrícolas	0,1	0,1

Posteriormente à elaboração do 1º Inventário do Estado de São Paulo, foram realizadas atualizações para alguns temas, como o cultivo de arroz irrigado por inundação e a queima de resíduos da cana-de-açúcar. No caso das emissões estaduais de metano por cultivo de arroz irrigado foi elaborada uma atualização das estimativas até 2009 (Lima; Villela, 2016). Observa-se pela Figura 26.8 que a área cultivada com arroz irrigado no estado encontra-se atualmente bem restrita, consequentemente afetando as emissões de metano, além de haver uma descontinuidade nas informações censitárias.

Para a queima de resíduos de cana-de-açúcar, observou-se que, apesar de um significativo aumento da área colhida de cana-de-açúcar no estado de São Paulo (205% entre 1990 e 2015) e da produção (207% no mesmo período), houve uma redução de 44,3% nas emissões estimadas de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{NO}_x$  (Figura 26.9), fato atribuído à progressiva diminuição da prática de queima na pré-colheita de cana-de-açúcar no estado (Lima et al., 2016). Esta redução deveu-se principalmente à aplicação da Lei 11.241 de 2002, na qual foi prevista a suspensão da queima dessa cultura em áreas mecanizáveis (terrenos com declividades iguais ou inferiores a 12%) até 2021, conforme mencionado anteriormente, bem como à crescente adoção de equipamentos para colheita de cana crua.



**Figura 26.8.** Distribuição das emissões de metano por cultivo de arroz irrigado por inundação no Estado de São Paulo no ano de 2009. Os círculos vermelhos representam a área de cultivo, em hectares (Lima; Villela, 2016).



**Figura 26.9.** Distribuição da emissão municipal de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e de  $\text{NO}_x$  provenientes da queima de cana-de-açúcar na pré-colheita no Estado de São Paulo no ano de 2006 (a) e de 2015 (b), segundo o método do IPCC-2006. Fonte: Lima et al. (2016).

## RESULTADOS DE ESTUDOS DE MENSURAÇÃO DE EMISSÃO DE GASES

Com o objetivo de aprimorar as estimativas de emissão de gases de efeito estufa no setor da agropecuária, a Embrapa Meio Ambiente foi uma das pioneiras em coordenar e desenvolver e estudos voltados a atividades de mensuração local de gases em sistemas de cultivo de arroz irrigado e de produção de bovinos no país.

Para a mensuração de GEE, e em especial do metano, no sistema de cultivo de arroz irrigado, foi iniciado um projeto em 2001 (Emissão de metano em cultivo de arroz irrigado por inundação: quantificação e análise), coordenado pela Embrapa Meio Ambiente, introduzindo a técnica da câmara fechada adaptada a este cultivo (Figura 26.10). O treinamento da equipe foi feito pelo Dr. Ronald Sass, um dos autores do *Guidelines* do IPCC, de 1996, e foi compartilhada com várias instituições de pesquisa, como a APTA - Polo Regional Vale do Paraíba, a Epagri e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sendo implantada nos Estados de São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Os locais de mensuração foram Pindamonhangaba (SP), Tremembé (SP), Itajaí (SC) e Cachoeirinha do Sul e Uruguaiana (RS). Em todas as áreas, foram instaladas passarelas de madeira para permitir a amostragem de gases (Figura 26.11). Como resultado desses estudos, foram gerados fatores de emissão de metano para diferentes tipos de manejo do solo e/ou da água (Tabela 26.6). Seguindo a mesma metodologia, outros estudos foram realizados no país (Figura 26.12). A disponibilidade de fatores de emissão de  $\text{CH}_4$  é um elemento chave para a realização de inventários tanto em nível regional como nacional. Em estudo conduzido em sistema pré-germinado por Lima et al. (2019a) foi estimado um fator de emissão de  $\text{CH}_4$  de  $6,5 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ . Este fator é cinco vezes maior que o indicado pelo IPCC de  $1,3 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ . Este alto valor demonstra que esforços devem ser direcionados para determinação dos fatores de emissão de  $\text{CH}_4$  para os diferentes solos representativos de produção de arroz.



Foto: Magda Aparecida de Lima

Figura 26.10. Câmaras de alumínio utilizadas para coleta de gases no cultivo de arroz irrigado por inundação.

Foto: Magda Aparecida de Lima



**Figura 26.II.** Passarelas de madeira para a coleta de amostras de gases em cultivo de arroz irrigado por inunda o.

**Tabela 26.6.** Fatores de emissão de metano (CH<sub>4</sub>) em cultivo de arroz irrigado por inunda o, por safra e sistema de plantio.

	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2010/11
	(kg CH <sub>4</sub> ha <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )							
Pindamonhangaba, SP								
IC (Tr.)	2,73±0,02	0,69±0,07	1,67±0,19	0,79±0,10	--	--	--	--
II (Tr.)	3,07±0,97	0,45±0,17	--	--	--	--	--	--
PG	--	--	--	--	--	--	--	2,27 <sup>***</sup>
Cachoeirinha, RS								
PC	3,07 <sup>1</sup>	--	--	--	--	--	--	--
PD	2,55 <sup>1</sup>	--	--	--	--	--	--	--
Itajaí, SC								
PG_SM	--	--	--	--	4,68	3,70/4,63 <sup>**</sup>	--	--
PG_SO	--	--	--	--	9,40	4,09 <sup>1</sup> / -- <sup>**</sup>	--	--
SSS_SM	--	--	--	--	--	-- <sup>2</sup> /2,98 <sup>**</sup>	--	--
Tremembé, SP								
PG	--	--	--	--	--	--	6,2	--

IC = Manejo contínuo de  gua; II = Manejo intermitente de  gua; Tr = sistema de transplântio; PG= sistema pr -germinado; PG\_SM = sistema pr -germinado em solo mineral; PG\_SO = sistema pr -germinado em solo orgânico; SSS\_SM= Sistema de plantio em solo seco, e posterior irriga o, em solo mineral; <sup>1</sup>Experimento 1; <sup>2</sup>Experimento 2; <sup>1</sup>Média de duas safras. Em vermelho: dados publicados em Lima et al., 2014; em azul: Lima et al., 2019a; em verde: Eberhardt et al., 2009; em roxo: Lima et al., 2007; em marrom: Lima et al., 2019b.



Figura 26.12. Áreas de estudo de mensuração de gases de efeito estufa no Brasil, utilizando o método de câmara fechada, no Brasil.

Com o mesmo objetivo de aprimorar estimativas nacionais e regionais de emissão de gases de efeito estufa, estudos foram conduzidos pela Embrapa Meio Ambiente, em parceria com a Embrapa Pecuária Sudeste, Instituto de Zootecnia e Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Campus de Jaboticabal, em sistemas de produção de bovinos de leite e de corte.

Dada a importância de grandes ruminantes, como os bovinos, na produção pecuária brasileira, reuniu-se um conjunto de parcerias para a mensuração e determinação da emissão de metano gerando os primeiros fatores de emissão obtidos sob condições de campo no país. O projeto inicial (Influência do manejo da produção animal sobre a emissão de metano em bovinos de corte - Convênio 01.0052.00/2001,

MCT/Embrapa/FAT/APTA), coordenado pela Embrapa Meio Ambiente, foi responsável pela introdução da técnica do traçador  $SF_6$  (Figura 26.13) no início de 2001, por meio de uma parceria estabelecida com a *U.S. Environmental Protection Agency (EPA)*, que incluiu o treinamento da equipe pelos desenvolvedores da técnica (Dr. Kristen Johnson e Dr. Hal Westberg, da *State Washington University*).

Os experimentos realizados por este grupo de pesquisadores resultaram no estabelecimento de fatores de emissão de metano de origem entérica por bovinos de corte e de leite (Tabelas 26.7 e 26.8). Estes fatores de emissão encontram-se atualmente publicados na Base de Dados de Fatores de Emissão de Gases de Efeito Estufa (EFDB) do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), a partir de 2020<sup>1</sup>.

Foto: Magda Aparecida de Lima



**Figura 26 13.** Implantação da técnica do traçador interno  $SF_6$  para a mensuração de metano ruminal pela equipe da Embrapa Meio Ambiente, em parceria à Embrapa Pecuária Sudeste e Instituto de Zootecnia em 2001.

Esta técnica foi recentemente adaptada e amplamente adotada por várias instituições de pesquisa no país em diferentes áreas experimentais para mensuração de metano em bovinos de corte e de leite (Figura 26.14) e de ovinos e caprinos (Figura 26.15), gerando grande número de fatores de emissão de metano por bovinos, caprinos e ovinos.

<sup>1</sup> Disponível em: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/find\\_ef\\_id.php](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/find_ef_id.php)



Figura 26.14. Áreas experimentais utilizando a técnica do traçador interno  $SF_6$  para mensuração de metano em sistemas de produção de gado de corte e de leite no país.



Figura 26.15. Áreas experimentais utilizando a técnica do traçador interno  $SF_6$  para mensuração de metano em sistemas de produção de gado de corte e de leite no país.

**Tabela 26.7.** Fatores de emissão de metano (kg CH<sub>4</sub> animal<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) para fermentação entérica de gado de corte.

Descrição do sistema	Fator de emissão	Referência
Bovinos mestiços adultos com 80% de feno de capim de <i>Cynodon dactylon</i> , cultivar <i>coast-cross</i> , com 20% de <i>Leucaena</i> , sem levedura.	53,86	Possenti et al., 2008.
Bovinos mestiços com 50% de feno de gramíneas do cultivar <i>coast-cross</i> de <i>Cynodon dactylon</i> , com 50% de <i>Leucaena</i> , sem fermento.	47,04	
Bovinos mestiços adultos com 80% de feno de gramíneas, 20% de <i>Leucaena</i> e 10% de levedura.	49,17	
Bovinos mestiços adultos com 50% de feno de capim, 50% de <i>Leucaena</i> e 10% de levedura.	51,72	
Novilhos Nelore de 18 meses no inverno (estação seca).	37,41	Demarchi et al., 2016.
Novilhos Nelore de 18 meses na estação da primavera (estação chuvosa).	48,18	
Novilhos Nelore de 18 meses no verão (estação chuvosa).	80,63	
Novilhos Nelore de 18 meses no outono (estação seca).	58,39	
Bovinos Nelore machos castrados, em confinamento, com dieta de <i>Brachiaria brizantha</i> em três estádios de desenvolvimento (15 dias).	48,55	Primavesi et al., 2004.
Bovinos Nelore machos castrados, em confinamento, com dieta de <i>Brachiaria brizantha</i> em três estádios de desenvolvimento (45 dias).	48,91	
Bovinos Nelore machos castrados, em confinamento, com dieta de <i>Brachiaria brizantha</i> em três estádios de desenvolvimento (90 dias).	50,37	
Silagem de tanino inferior sorgo + ureia (LTSU).	18,08	Oliveira et al., 2007.
Silagem de tanino inferior sorgo + concentrado (LTSC).	24,32	
Silagem de tanino alto sorgo + ureia (HTSU).	17,98	
Silagem de tanino superior de sorgo + concentrado (HTSC).	25,71	
Bovinos de corte alimentados com silagem de sorgo e 0% de concentrado (Consumo de matéria seca: 5,5 kg.dia <sup>-1</sup> ), em confinamento.	45,70	Pedreira et al., 2013.
Bovinos de corte alimentados com silagem de sorgo e 30% de concentrado (Consumo de matéria seca: 7,9 kg.dia <sup>-1</sup> ), sob confinamento.	54,71	
Bovinos de corte alimentados com silagem de sorgo e 60% de concentrado (Consumo de matéria seca: 8,7 kg.dia <sup>-1</sup> ), em confinamento.	51,25	

**Tabela 26.7.** Fatores de emissão de metano (kg CH<sub>4</sub> animal<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) para fermentação entérica de gado de leite citados em Pedreira et al., 2009.

Descrição do sistema	Fator de emissão (kg animal <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )
Bovinos leiteiros adultos (Holstein-vacas em lactação) e produção média de leite de 22,7 L d <sup>-1</sup> no verão, mantidos em pastagem de capim-tanzânia ( <i>Panicum maximum</i> Jacq. Cv. Tanzânia), fertilizado com 400 kg ha <sup>-1</sup> de N e K <sub>2</sub> O cada um dividido cinco vezes após o pastejo. Suplementado diariamente com 1 kg de concentrado para cada 3 L de leite.	147,17
Bovinos leiteiros adultos (Mestiços Leiteiros, Holandês ¾ x Gir (Zebu) ¼) - Vacas em lactação e produção média de leite de 13,3 L d <sup>-1</sup> , no verão, mantidas em pastagem de capim-braquiária ( <i>Brachiaria decumbens</i> cv. Basilisk), sob as mesmas condições de fertilidade do solo da pastagem de capim Tanzânia. Suplementado diariamente com 3,4 kg de concentrado por vaca.	121,40
Bovinos leiteiros adultos (Holstein - vacas secas) na temporada de verão, mantidos em pastagem de capim-Tanzânia ( <i>Panicum maximum</i> Jacq. cv. Tanzânia), fertilizados com 400 kg ha <sup>-1</sup> de N e K <sub>2</sub> O cada dividido cinco vezes após o pastejo. Suplementado diariamente com 2 kg de concentrado por animal.	102,20
Bovinos leiteiros adultos (Mestiços Brasileiros de Leite, Holandês ¾ x Gir (Zebu) ¼) - Vacas secas, na temporada de verão, mantidas em pastagem de capim-tanzânia ( <i>Panicum maximum</i> Jacq. Cv. Tanzânia), fertilizada com 400 kg ha <sup>-1</sup> de N e K <sub>2</sub> O cada um dividido cinco vezes após o pastejo. Suplementado diariamente com 2 kg de concentrado por animal.	107,49
Novilhas leiteiras (Holandesa), no verão, em pastagem adubada com suplementação (sistema intensivo).	81,10
Novilhas leiteiras (Mestiço Leiteiro Brasileiro, Holandês ¾ x Gir (Zebu) ¼), no verão, em pastagem adubada com suplementação (sistema intensivo).	84,90
Novilhas leiteiras (Holandesa), no verão, em pastagem de capim-braquiária, não fertilizada e não suplementada com concentrado (sistema extensivo).	72,42
Novilhas leiteiras (Mestiço Leiteiro Brasileiro, Holandês ¾ x Gir (Zebu) ¼), no verão, em pastagem de capim-braquiária, não fertilizada e não suplementada com concentrado (sistema extensivo).	66,07
Bovinos leiteiros adultos (Holandês - Vacas em lactação) e produção média de leite de 24,3 L d <sup>-1</sup> no outono, alimentados com silagem de milho, 10 kg de matéria seca animal <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> .	139,87
Bovinos leiteiros adultos (mestiços de leite, Holandês ¾ x Gir (Zebu) ¼) - Vacas em lactação e produção média de leite de 9,7 L d <sup>-1</sup> , no outono, alimentadas com milho picado, 8 kg MS animal <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup> , mantendo a mesma dieta concentrada de seu rebanho específico, ajustada à capacidade de produção e necessidades diárias.	108,15
Gado leiteiro adulto (Holstein - vacas secas), no outono, pastagem de capim-tanzânia fertilizado.	95,37
Bovinos leiteiros adultos (Mestiços: Holandês ¾ x Gir (Zebu) ¼) - Vacas secas, no outono, pastando capim-Tanzânia fertilizado.	87,02
Novilhas leiteiras (Holstein), no outono, em pastagem de capim-tanzânia fertilizada (sistema intensivo).	89,43
Novilhas leiteiras (Mestiço: Holandês ¾ x Gir (Zebu) ¼), no outono, em pasto fertilizado de capim-tanzânia (sistema intensivo).	69,57
Novilhas leiteiras (Holandesa), no outono, em pastagem de capim-braquiária não fertilizada e sem suplementação (sistema extensivo).	57,38
Novilhas leiteiras (Mestiço Brasileiro de Leite, Holandês ¾ x Gir (Zebu) ¼), no outono, em pastagem de capim braquiária não fertilizada e sem suplementação (sistema extensivo).	65,81

Obs. Os estudos utilizaram a técnica de mensuração do gás traçador de hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>), conforme descrito por Johnson et al. (1994, 2007) e adaptado por Primavesi et al. (2004).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os relatórios de referência elaborados para os inventários periódicos de emissão de gases de efeito estufa no país constituem uma importante ferramenta de política ambiental, servindo de referência para iniciativas estaduais e para a gestão de recursos naturais no âmbito das cadeias produtivas. O IPCC tem aprimorado periodicamente sua metodologia de elaboração de inventários, e um conjunto cada vez maior de informações e dados de parâmetros específicos a cada atividade agropecuária é cada vez mais demandado. Em função disto, a série histórica de emissões é ajustada, podendo diferir numericamente das estimativas iniciais.

A realização de estudos de mensuração de emissão de gases no âmbito da agropecuária brasileira tem fornecido um conjunto extraordinário de informações para muitos dos setores de produção, tendo como um dos importantes resultados a proposição de novos fatores de emissão de gases em diferentes sistemas de produção, de cultivo e de manejo de solo. As redes de pesquisa Agrogases, Pecos, Fluxus e Saltus, coordenadas pela Embrapa produziram uma extensa base de dados obtidos a partir de mensurações locais e estimativas de fluxos de gases no país, somadas as pesquisas de várias instituições, como a USP, UFRGS, entre outras. Os próximos relatórios poderão contar com um acervo representativo de fatores de emissão de gases, disponibilizados em grande parte nas Coletâneas dos fatores de emissão e remoção de GEE da agricultura e da pecuária brasileira (Brasil, 2020a, 2020b), bem como em outras fontes de dados (Alves et al., 2014). Tais coletâneas deverão também apoiar o processo de revisão do Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (Plano ABC).

A utilização do nível metodológico *Tier 3* deverá cada vez mais ser uma opção interessante para a elaboração dos inventários nacionais à medida que se disponha de dados de fatores de emissão e de parâmetros essenciais relativos às atividades agropecuárias para diferentes regiões e sistemas de produção existentes no país. Do mesmo modo, será possível elaborar meta-análises nacionais para as diferentes fontes de emissão de gases.

## REFERÊNCIAS

ALVES, B. J. R.; CARVALHO, A. M. de; JANTALIA, C. P.; MADARI, B. E.; URQUIAGA, S.; SANTOS, J. C. F.; SANTOS, H. P.; CARVALHO, C. J. R. Emissions of soil nitrous oxide and nitric oxide in Brazilian agricultural systems. In: BODDEY, R. M.; LIMA, M. A. de; ALVES, B. J. R.; MACHADO, P. L. O. de A.; URQUIAGA, S. **Carbon stocks and greenhouse gas emissions in Brazilian agriculture**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. Chapter 5.

AMAZONAS. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Centro Estadual de Mudanças Climáticas. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa do setor elétrico do Estado do Amazonas: 2002-2008**. Manaus: [SDS], 2010. 102 p.

BAHIA. Secretaria do Meio Ambiente do Estado. **Primeiro inventário de emissões antrópicas de gases do efeito estufa do Estado da Bahia**. [Salvador: SEMA], 2010. 7 p.

BONT, J. A. M.; LEE, K. K.; BOULDIN, D. F. Bacterial oxidation of methane in a rice paddy. *Ecological Bulletin Stockholm*, v. 26, p. 91-96, 1978.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Coletânea de fatores de emissão e remoção de gases de efeito estufa da pecuária brasileira**. Brasília: MAPA/SENAR, 2020a. 162 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Coletânea de fatores de emissão e remoção de gases de efeito estufa da agricultura brasileira**. Brasília: MAPA/SENAR, 2020b. 147 p.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Comunicação nacional inicial do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília, DF, 2004. 274 p.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Segunda comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**, volume 1. Brasília, DF, 2010. 280 p.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Quarta comunicação nacional do Brasil a convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2020c. 622 p. Disponível em: [https://repositorio.mctic.gov.br/bitstream/mctic/4782/1/2020\\_quarta\\_comunicacao\\_nacional\\_brasil\\_convencao\\_quadro\\_nacoes\\_unidas\\_sobre\\_mudanca\\_clima.pdf](https://repositorio.mctic.gov.br/bitstream/mctic/4782/1/2020_quarta_comunicacao_nacional_brasil_convencao_quadro_nacoes_unidas_sobre_mudanca_clima.pdf). Acesso em: 17 abr. 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Quarta comunicação nacional do Brasil a convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2020d. 516 p. Disponível em: [https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/arquivos/SIRENE/Comunicacoes-Nacionais-do-Brasil-a-UNFCCC/2020\\_12\\_22\\_4CN\\_v5\\_PORT\\_publicada.pdf](https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/arquivos/SIRENE/Comunicacoes-Nacionais-do-Brasil-a-UNFCCC/2020_12_22_4CN_v5_PORT_publicada.pdf). Acesso em: 17 abr. 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Terceira comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima: sumário executivo**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2010. 41 p.

CETESB. **Inventário de emissões antrópicas de gases de efeito estufa diretos e indiretos do Estado de São Paulo, 1: comunicação estadual**. 2.ed. - São Paulo: CETESB, 2011. 192 p.

**CETESB. 1º Inventário de emissões antrópicas de gases de efeito estufa diretos e indiretos do Estado de São Paulo: emissões do setor de agropecuária.** São Paulo, 2015. 174 p.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar.** Brasília, 2018. v.5 – Safra 2018/19 – n. 1. CORE WRITING TEAM; PACHAURI, R. K.; MEYER, L. A. (ed.). **Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.** Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p.

COSTA, F. de S.; AMARAL, E. F. de (ed.). **Inventário de emissões antrópicas e sumidouros de gases de efeito estufa do estado do Acre: ano-base 2012.** Brasília, DF: Embrapa, 2014. 98 p.

DEMARCHI, J. J. A. DE A.; MANELLA, M. Q.; PRIMAVESI, O. M. A. S. P. R.; FRIGHETTO, R. T. S.; ROMERO, L. A.; BERNDT, A.; LIMA, M. A. Effect of seasons on enteric methane emissions from cattle grazing *Urochloa brizantha*. **Journal of Agricultural Science**, Toronto, v. 8, n. 4, p. 106-115, 2016.

EBERHARDT, D. S.; LIMA, M. A. de; ANDRADE, S. A. L. de; PESSOA, M. C. P. Y.; NOLDIN, J. A.; OLIVEIRA, L. C. de. Emissão de metano em arroz irrigado em Santa Catarina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 6, 2009, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre, v. 1, p. 163-166. 2009. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/578037/emissao-de-metano-em-arroz-irrigado-em-santa-catarina>. Acesso em: 30 abr. 2019.

EGGLESTON, H. S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (ed.). **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.** Japan: IPCC/IGES, 2006. 5 v. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Acesso em: 14 maio 2020.

FEPAM. **Inventário das emissões de gases de efeito estufa do Rio Grande do Sul 2005.** Porto Alegre, 2010. 58 p. Disponível em: [http://inventariogeosp.cetesb.sp.gov.br/wpcontent/uploads/sites/30/2014/04/Inventario\\_GEE\\_RS\\_2005\\_PACE\\_RS\\_2010\\_FEPAM.pdf](http://inventariogeosp.cetesb.sp.gov.br/wpcontent/uploads/sites/30/2014/04/Inventario_GEE_RS_2005_PACE_RS_2010_FEPAM.pdf). Acesso em 24 fev. 2016.

GAROFALO, D. F. T.; PACKER, A. P. C.; RAMOS, N. P.; KONDO, V. K.; FOLEGATTI, M. I. S.; CABRAL, O. M. R. Dinâmica na cultura da cana-de-açúcar no Brasil: 1990 a 2018. **Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente**, 2020. 41 p.

GAVRILOVA, O.; LEIP, A.; DONG, H.; MACDONALD, J. D.; GOMEZ BRAVO, C. A.; AMON, B.; BARAHONA ROSALES, R.; PRADO, A. del; LIMA, M. A. de; OYHANTÇABAL, W.; WEERDEN, T. J. van der; WIDIAWATI, Y. Emissions from livestock and manure management. In: CALVO BUENDIA, E.; TANABE, K.; KRANJC, A.; BAASANSUREN, J.; FUKUDA, M.; NGARIZE, S.; OSAKO, A.; PYROSHENKO, Y. SHERMANAU, P.; FEDERICI, S. (Ed.). **Refinement to the 2006 guidelines for national greenhouse gas inventories.** Agriculture, forestry and other land use. Geneve: IPCC, 2019. v. 4. cap. 10. p. 10.9-10.167.

HOUGHTON, J. T.; MEIRA FILHO, L. G.; LIM, B.; TRÉANTON, K.; MAMATY, I.; BONDUKI, Y.; GRIGGS, D. J.; ALLANDER, B. A. (ed.). **Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse inventories.** Paris: IPCC/OECD/IEA, 1996. 3 v. Disponível em: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invsi.html>. Acesso em: 8 set. 2020.

JOHNSON, K.; HUYLEYER, M.; WESTBERG, H.; LAMB, B.; ZIMMERMAN, P. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a SF6 tracer technique. **Environmental Science Technology**, v. 28, n. 2, p. 359–362, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1021/es00051a025>.

JOHNSON, K.; WESTBERG, H.; MICHAL, J.; COSSALMAN, M. (2007) The SF<sub>6</sub> tracer technique: methane measurement from ruminants. In: MAKKAR, H.P.; VERCOE, P.E. (ed.). **Measuring methane production from ruminants**. Dordrecht: Springer, 2007. Chapter 3, p. 33-67. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6133-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6133-2_3).

LIMA, M. A. de, EBERHARDT, D. S., PESSOA, M. C. P. Y., FRIGHETTO, R. T. S.; NOLDIN, J. A.; VALÉRIO NETO, S.; PLEC, D. F.; MALBURG, L. C.; PINHEIRO, G.F.; OLIVEIRA, D. N. S.; BACCAN, M. Emissão de metano em lavouras de arroz irrigado sob sistema pré-germinado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 5., 2007, Pelotas. **Anais... Pelotas: Embrapa Clima Temperado**, 2007. v. 1. p. 417-419, 2007. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/15997/emissao-de-metano-em-lavouras-de-arroz-irrigado-sob-sistema-pre-germinado>. Acesso em: 17 abr. 2019.

LIMA, M. A. de; FRIGHETTO, R. T. S.; VILLELA, O. V.; COSTA, F. de S.; BAYER, C.; MACEDO, V. R. M.; MARCOLIN, E. Methane emissions in flooded rice cultivation. In: BODDEY, R. M. et al. (ed.). **Carbon stocks and greenhouse gas emissions in Brazilian agriculture**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. Chapter 6.

LIMA, M. A. de; LUIZ, A. J. B.; NEVES, M. C. **Gases de efeito estufa da queima de cana-de-açúcar no estado de São Paulo: 1990 a 2015**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016. 33 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 107).

LIMA, M. A. de; VIEIRA, R. F.; FRIGHETTO, R. T. S.; LUIZ, A. J. B.; VILLELA, O. V. Methane emission from a flooded rice field under pre-germinated system. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 49, n. 11, e20190336, 2019a.

LIMA, M. A. de; VIEIRA, R. F.; LUIZ, A. J. B.; GALVÃO, J. A. H.; VILLELA, O. V. **Emissão de metano em área de arroz irrigado sob sistema pré-germinado em Pindamonhangaba, SP, Jaguariúna, SP**: Embrapa Meio Ambiente, 2019b. 22 p. (Embrapa Meio Ambiente. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 86).

LIMA, M. A. de; VILLELA, O. **Estimativa de Emissão de Metano Proveniente da Cultura de Arroz Inundado no Estado de São Paulo: Aplicação do Método do IPCC de 2006**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2016. 35 p. (Documentos, 103).

MINAS GERAIS. Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2008. 120 p.

MYHRE, G. D.; SHINDELL, F.-M. (coord.). Anthropogenic and natural radiative forcing. In: **CLIMATE CHANGE 2013: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 82 p.

NEUE, H.-U. Methane Emission from Rice Fields: Wetland rice fields may make a major contribution to global warming. **BioScience**, v.43, n.7, p.466-474, July/Aug.1993. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/1311906>. Acesso em: 20 dez. 2020.

OLIVEIRA, S. G.; BERCHIELLI, T. T.; PEDREIRA, M. S.; PRIMAVESI, O.; FRIGHETTO, R.; LIMA, M. A. de. Effect of tannin levels in sorghum silage and concentrate supplementation on apparent digestibility and methane emission in beef cattle. **Animal Feed Science and Technology**, v. 135, n. 3-4, p. 236-248, 2007.

PEDREIRA, M. dos S.; OLIVEIRA, S. G. DE; PRIMAVESI, O. M. A. S. P. R.; LIMA, M. A. de; FRIGHETTO, R. T. S.; BERCHIELLI, T. T. Methane emissions and estimates of ruminal fermentation parameters in beef cattle fed different dietary concentrate levels. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 42, n. 1, p. 592-598, 2013.

PEDREIRA, M. dos S.; PRIMAVESI, O.; LIMA, M. A. de; FRIGHETTO, R.; OLIVEIRA, S. G. de; BERCHIELLI, T. T. Ruminant methane emission by dairy cattle in southeast Brazil. *Scientia Agricola*, v. 66, n. 6, p. 742-750, Nov./Dec. 2009.

PENMAN, J.; KRUGER, D.; GALBALLY, I.; HIRAISHI, T.; NYENZI, B.; ENMANUEL, S.; BUENDIA, L.; HOPPAUS, R.; MARTINSEN, T.; MEIJER, J.; MIWA, K.; TANABE, K. (ed.). **Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories**. Hayama, Japan: IPCC/OECD/IEA/IGES, Chapter 4, 2000. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/publication/good-practice-guidance-and-uncertainty-management-in-national-greenhouse-gas-inventories/>. Acesso em: 20 ago. 2021.

POSSENTI, R. A.; FRANZOLIN, R.; SCHAMMAS, E. A.; DEMARCHI, J. J. A. A.; FRIGHETTO, R. T. S.; LIMA, M. A. de. Efeitos de dietas contendo *Leucaena leucocephala* e *Saccharomyces cerevisiae* sobre a fermentação ruminal e a emissão de gás metano em bovinos. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 37, n. 8, p. 1509-1516, 2008.

PRIMAVESI, O.; FRIGHETTO, R.T.S.; PEDREIRA, M. S.; LIMA, M.A.; BERCHIELLI, T.T.; BARBOSA, P.F. Metano entérico de bovinos leiteiros em condições tropicais brasileiras. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, n. 3, p. 277-283, mar. 2004.

RIO DE JANEIRO. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, COPPE/CLIMA. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa do estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2007. 307 p.

SÃO PAULO. Decreto nº 55.947, 24 de junho de 2010. Regulamenta a Lei nº13.798, de 9 de novembro de 2009, que dispõe sobre a Política Estadual de Mudanças Climáticas. Diário Oficial [do] Estado de São Paulo, Poder Executivo, São Paulo, 25 maio 2010. Seção 1, v. 120, n. 119, p. 1-5. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2010/decreto-55947-24.06.2010.html>. Acesso em: 15 abr. 2024.

SAUNOIS, M.; STAVERT, A. R.; POULTER, B.; BOUSQUET, P.; CANADELL, J. G.; JACKSON, R. B.; RAYMOND, P. A.; DLUGOKENCKY, E. J.; HOUWELING, S.; PATRA, P. K.; CIAIS, P.; ARORA, V. K.; BASTVIKEN, D.; BERGAMASCHI, P.; BLAKE, D. R.; BRAILSFORD, G.; BRUHWILER, L.; CARLSON, K. M.; CARROL, M.; CASTALDI, S.; CHANDRA, N.; CREVOISIER, C.; CRILL, P. M.; COVEY, K.; CURRY, C. L.; ETIOPE, G.; FRANKENBERG, C.; GEDNEY, N.; HEGGLIN, M. I.; HÖGLUND-ISAKSSON, L.; HUGELIUS, G.; ISHIZAWA, M.; ITO, A.; JANSSENS-MAENHOUT, G.; JENSEN, K. M.; JOOS, F.; KLEINEN, T.; KRUMMEL, P. B.; LANGENFELDS, R. L.; LARUELLE, G. G.; LIU, L.; MACHIDA, T.; MAKSYUTOV, S.; MCDONALD, K. C.; MCNORTON, J.; MILLER, P. A.; MELTON, J. R.; MORINO, I.; MÜLLER, J.; MURGUIA-FLORES, F.; NAIK, V.; NIWA, Y.; NOCE, S.; O'DOHERTY, S.; ROBERT J. PARKER, R. J.; PENG, C.; PENG, S.; PETERS, G. P.; CATHERINE PRIGENT, C.; PRINN, R.; RAMONET, M.; REGNIER, P.; RILEY, W. J.; ROSENTRETER, J. A.; SEGERS, A.; SIMPSON, I. J.; SHI, H.; STEVEN J. SMITH, S. J.; STEELE, L. P.; THORNTON, B. F.; TIAN, H.; TOHJIMA, Y.; TUBIELLO, F. N.; TSURUTA, A.; VIOVY, N.; VOULGARAKIS, A.; THOMAS S. WEBER, T. S.; WEELE, M. VAN; WERF, G. R. VAN DER; WEISS, R. F.; WORTHY, D.; WUNCH, D.; YIN, Y.; YOSHIDA, Y.; ZHANG, W.; ZHANG, Z.; ZHAO, Y.; ZHENG, B.; ZHU, Q.; ZHU, Q.; ZHUANG, Q. The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, v. 12, p. 1561–1623, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>. Acesso em: 15 abr. 2020.

TIAN, H., XU, R., CANADELL, J.G. et al. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. *Nature*, v. 586, p. 248–256, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2780-0>. Acesso em: 3 ago. 2021.

USSIRI, D., LAL, R. *Soil emission of nitrous oxide and its mitigation*. Rotterdam: Springer Dordrecht, 2013. p. 378.



# AGRICULTURA DE BAIXO CARBONO: ALTERNATIVA PARA A SUSTENTABILIDADE E ADAPTAÇÃO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

*Celso Vainer Manzatto, Sandro Eduardo Marschhausen Pereira, Ladislau Araújo Skorupa e Daniel Gomes dos S. W. Loebmann*

## INTRODUÇÃO

O setor agropecuário brasileiro vem assumindo protagonismo e responsabilidade crescente na segurança alimentar global, com ganhos crescentes de produção, num processo que reuniu eficiência produtiva, desenvolvimento científico e tecnológico, organização empresarial e novas formas de comercialização, com forte protagonismo do setor privado (Embrapa, 2018), contribuindo também para o crescimento da indústria associada ao setor e representando cerca de 27,4% do PIB brasileiro em 2021 (PIB..., 2023). Porém, o grande desafio atual é manter essa trajetória de aumento constante da produção e produtividade, gerando segurança alimentar com sustentabilidade socioambiental. Esse desafio surge em meio aos debates e às pressões sociais por um novo modelo de desenvolvimento, que seja capaz de conciliar crescimento econômico e conservação do meio ambiente (Sambuichi et al., 2012), aumentando a resiliência dos sistemas produtivos e reduzindo as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).

De fato, agricultura nos trópicos exige muito mais do que apenas a produção de alimentos para a população, matérias-primas para a agroindústria, e excedentes exportáveis que favoreçam o balanço de pagamentos. Envolve também a adoção de tecnologias modernas e sustentáveis, desenvolvidas especialmente para a região, que assegurem menor impacto ambiental.

Este foi o contexto em que foi elaborada a primeira fase do Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – Plano ABC 2010–2020 (Brasil, 2012), uma iniciativa estratégica e pioneira brasileira para conciliar a segurança alimentar com a sustentabilidade ambiental. A estratégia, também denominada Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (ABC), possui como princípios básicos a baixa emissão e/

ou a mitigação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no uso e manejo da terra, em decorrência da adoção das melhores práticas de gestão agrícola, e o alto potencial de sequestro de C com a adoção de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (Sá et al., 2017). Para o setor agropecuário, o Plano ABC significou o maior plano de fomento a tecnologias sustentáveis de produção do mundo. Contou ainda com recursos do crédito rural para incentivo à adoção das tecnologias de baixa emissão de carbono pelos agricultores, além de ações de fomento, treinamento e disseminação das práticas e das tecnologias ABC.

O presente capítulo aborda a evolução do Plano ABC e suas contribuições na redução das emissões, destacando-se a importância do papel fundamental dos solos e de seu uso adequado para a sustentabilidade da agropecuária, que constitui hoje a base do complexo agroindustrial gerador de divisas.

## A DINÂMICA ESPACIAL RECENTE NO USO E OCUPAÇÃO DAS TERRAS

O Mapa da cobertura e uso da terra no Brasil, representado na Figura 27.1, apresenta os diversos usos da terra em diferentes condições ecológicas, permitindo destacar diferentes padrões de utilização nos estados brasileiros, bem como observar o predomínio de áreas naturais nos estados da Região Norte e a extensão da agropecuária no Brasil. A área de cobertura com formação florestal no País representa cerca de 508,7 milhões de hectares, ou 59,79% do território nacional; áreas com formação natural não florestal somam 53,9 milhões de hectares; a agropecuária conta com 265 milhões de hectares, correspondente a 31,15% do território; e 33,5 milhões de hectares (2,72%) são de áreas não vegetadas, corpo d'água e não classificado.

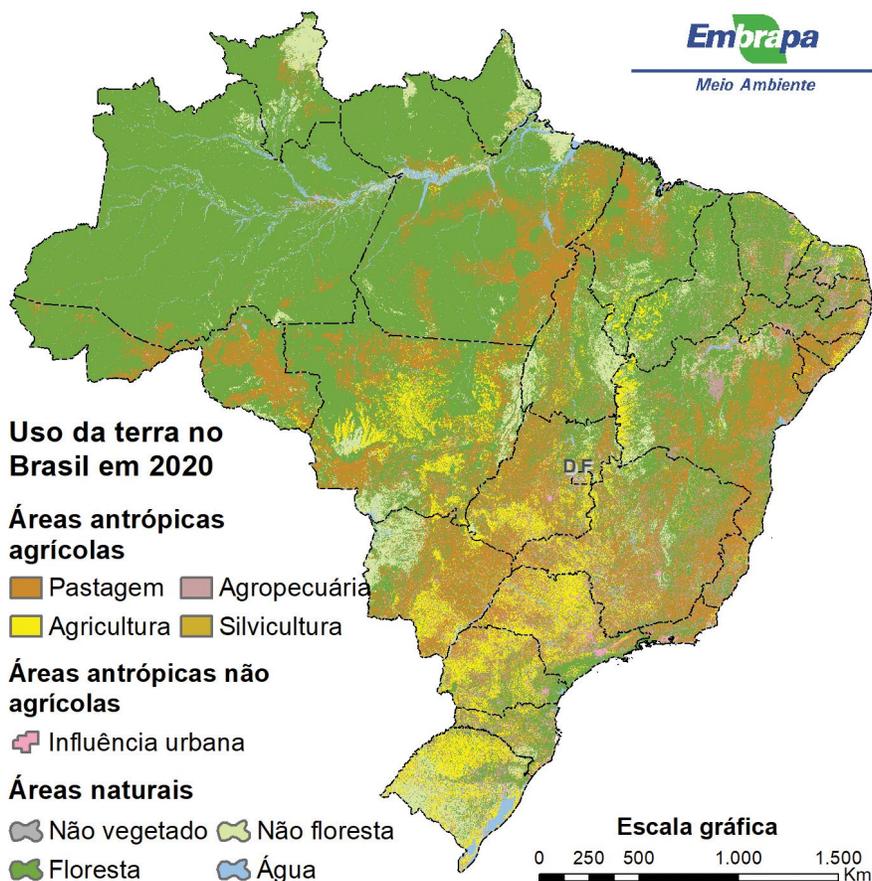


Figura 27.1. Mapa de cobertura e uso da terra no Brasil em 2021.

Fonte: Adaptado de MapBiomass (2023a).

Segundo o IBGE (2022d), entre 2016 e 2018, cerca de 1% do território brasileiro sofreu alguma mudança na cobertura e uso da terra, dando-se a substituição das áreas de vegetação natural por áreas antrópicas, e o avanço das áreas agrícolas sobre áreas de pastagem, com uma perda de cobertura natural de 7,6% da área de vegetação florestal e de 10% da vegetação campestre entre 2000 e 2018. Considerando o período de 1985 a 2021 (Figura 27.2), a formação florestal no Brasil teve uma redução de cerca de 50,2 milhões de hectares (-11,3%); a formação savânica, de 27,5 milhões de hectares (-19,5%); e outras formações não florestais, de 7 milhões de hectares (-11,65%). A ex-

pansão das pastagens no período foi da ordem 42,2 milhões de hectares (38,8%), sendo a agricultura com expansão de 43,6 milhões de hectares (228%); e a silvicultura, de 7,3 milhões de hectares (3%). Já os mosaicos de usos tiveram redução de 8,5 milhões de hectares (-16,7%) no período considerado (SEEG, 2022a).

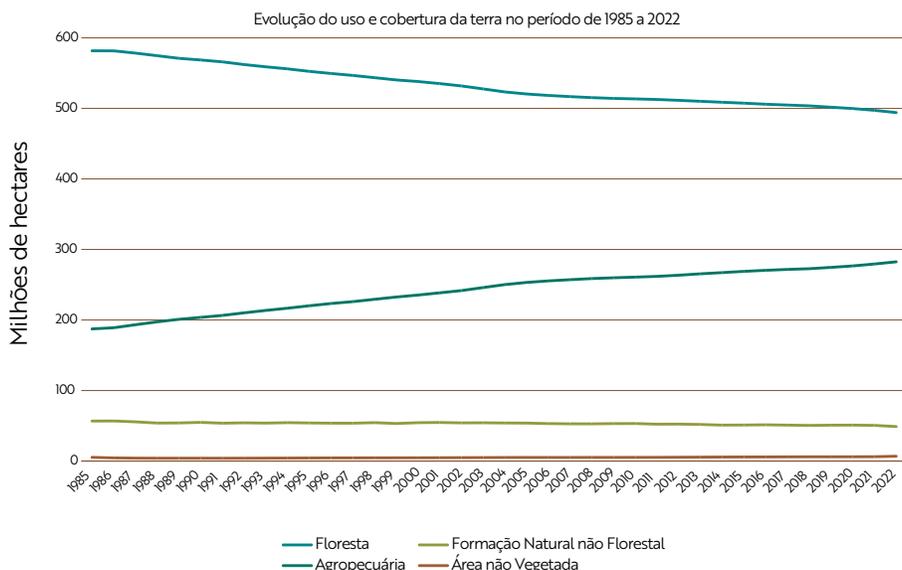
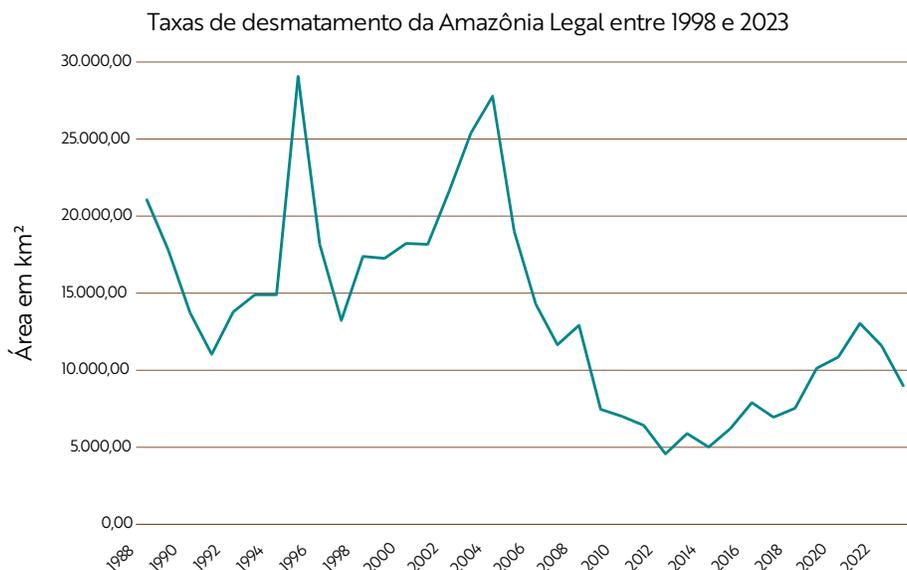


Figura 27.2. Evolução do uso e cobertura da terra no período de 1985 a 2021.  
Fonte: MapBiomas (2023b).

As taxas de desmatamento diminuíram nos anos recentes, a exemplo da Amazônia Legal, onde a redução foi de cerca de 75% no período entre 2003 e 2017, passando de uma área de desmatamento de 25,4 mil km<sup>2</sup> para 6,6 mil km<sup>2</sup> em 2017 (Terra..., 2022) (Figura 27.3). Mais recentemente, a taxa anual média de desmatamento entre 2015 e 2017 foi de 7.015 km<sup>2</sup> por ano, ficando 35% acima da taxa mais baixa registrada, em 2012. A partir de 2015, observa-se uma tendência de desmatamento por corte raso, que, entre o período de 10 de agosto de 2019 e 31 de julho de 2020, foi de 10.851 km<sup>2</sup>, e, até 2021, de 13.038 km<sup>2</sup>. Esses valores representaram um aumento de 7,13% para o primeiro período e de 12,9% em 2021, quando comparados com a taxa de desmatamento apurada pelo Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES) em 2019, que foi de 10.129 km<sup>2</sup> para os nove estados da Amazônia Legal. Entre os fatores que podem estar associados à retomada do desmatamento, destacam-se as mudanças no novo Código Florestal em 2012 (Araújo et al., 2017), a redução nas operações de comando e controle e o baixo cumprimento dos acordos de desmatamento zero dos setores da pecuária e da soja.



**Figura 27.3.** Taxas de desmatamento da Amazônia Legal entre 1998 e 2021.  
Fonte: Terra... (2022).

Entretanto, considerando a disponibilidade de fronteiras agrícolas no País, torna-se necessária uma abordagem sobre os estoques de terra que considere os princípios de alocar cada parcela de terra de acordo com sua aptidão, capacidade de sustentação e produtividade econômica esperada, com o mínimo de degradação ambiental, de modo que os recursos naturais sejam considerados no melhor de seu potencial de uso. Para essa abordagem, foram utilizadas informações aeroespaciais disponíveis em diversas bases de dados, integrando-as para a delimitação das terras indígenas no Brasil (Funai, 2011), das unidades de conservação de proteção integral (Brasil, 2013) e dos biomas brasileiros (IBGE, 2022f); e para a identificação do uso antrópico nos anos de 2008, 2015 e de 2020 (MapBiomas, 2023b), da aptidão edáfica para terras altas em regime (adaptado de Manzatto et al., 2009) e da declividade (Terra..., 2011), agrupada nas classes de declividade de 0–12%, 12–20% e maiores que 20%.

A Tabela 27.1 sintetiza os principais estoques de terra sob vegetação nativa e uso agropecuário no Brasil. Em 2020, a área antropizada foi estimada em 262,5 Mha ou 30,84% do território nacional. Ou seja, um aumento de 6,97% (17,9 Mha) em relação ao ano de 2008. Do total, 30,56% ou 260,05 Mha de terras estão sob uso agropecuário, excluídas as áreas indígenas e unidades de conservação de proteção integral (UCPI), ou sem restrições institucionais (Agropecuário Livre). Do total de terras sob

uso agropecuário, 192,54 Mha, ou 74,04% delas, foram em terras com aptidão agrícola; 56,6 Mha de terras sem aptidão agrícola (Agr-Inaptas) com declividade até 20%; e 7,4 Mha com fortes limitações ao uso agrícola, com declividade acima de 20%, que podem ser utilizadas prioritariamente para recomposição de passivos ambientais. As terras com vegetação natural remanescente foram da ordem de 565,50 Mha, ou 66,45% do território nacional. Ou seja, uma redução de 2,89% sobre o ano de 2008. Do total das áreas sob cobertura vegetal, existem 244,4 Mha de terras aptas ou com potencial ao uso agrícola (VeG-apta), das quais 191,8 Mha com declividade até 12% (terras mecanizáveis) e 22,1 Mha com declividade entre 12 e 20% (com restrições à mecanização). Foi observado que, entre 2008 e 2020, o Brasil teve uma taxa anual de aumento da área com uso agropecuário de 1,42 Mha por ano, com a mesma taxa de redução de remanescentes, sendo certo que 97,7% dessa expansão foi em áreas não protegidas, é dizer, fora de UCPI e de terras indígenas. Além disso, houve aumento de cerca de 0,52% entre a referida taxa do período de 2008 a 2015 e a do período de 2015 a 2020, o que pode representar que houve um aumento do ritmo de incorporação de novas áreas pelo setor agropecuário a partir de 2015.

As terras indígenas demarcadas foram estimadas em 108,41 Mha, ou 12,74% do território, e dessas 1,33% já foram antropizadas. As UCPI representam 52,96 Mha, 6,22% do País, com 1,0 Mha alterados e/ou com uso antrópico. Corpos d'água e áreas alagadas representam 16,55 Mha.

As áreas institucionais protegidas (UCPI e terras indígenas) representam 18,96% da área do País. Ressalta-se que estão concentrados na Região Norte do País. Esta detém 83,84% das áreas institucionais, seguida da Região Centro-Oeste (10,44%), Nordeste (3,79%), Sudeste (1,69%) e Sul (0,24%). Quanto às unidades da Federação, 37,10% dessas áreas estão no estado do Amazonas, 25,63% no estado do Pará, 9,47% no estado do Mato Grosso, 7,07% no estado de Roraima, 5,05% em Rondônia, e os demais estados somam 15,67%.

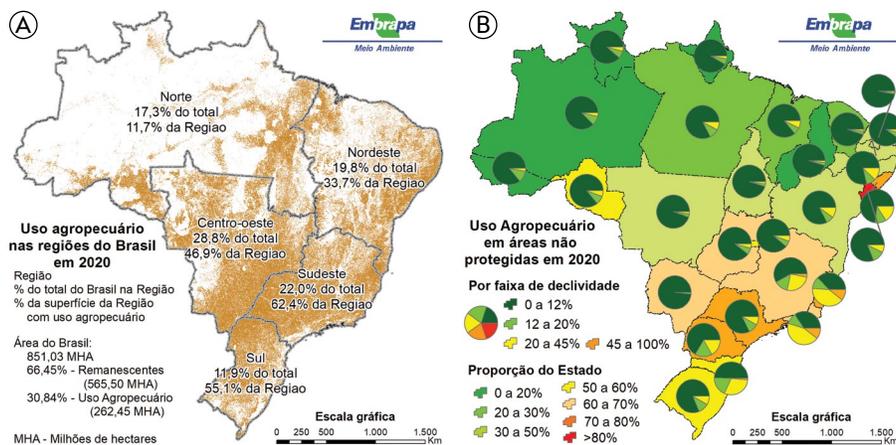
**Tabela 27.1.** Percentual das emissões de GEE provenientes da Agropecuária e Mudança no uso da terra no Brasil nos anos de 1990, 1995, 2000, 2005 e 2010, com base nos dados da 3ª. Comunicação Nacional.

Tipos de uso	2008	2015		exc2020		
	Área (Mha)	Área (Mha)	Área Mha	% Brasil	Até 12% de Declive (Mha)	De 12% a 20% de Declive (Mha)
Brasil*	851,03			100,00	674,38	73,28
Amazônia Legal**	502,73			59,07	419,81	40,57
Remanescentes	582,34	574,39	565,50	66,45	441,71	50,18
Remanescente Livre	429,44	421,49	412,99	48,53	323,99	35,45
Remanescente Livre Apto	255,76	250,11	244,36	-	191,08	22,09
Agropecuário	245,36	253,82	262,45	30,84	212,33	21,61
Agropecuário Livre	243,36	251,77	260,05	-	210,56	21,40
Agropecuário Livre Apto	181,53	186,96	192,54	-	155,59	16,08
Antrópico Inapto	62,66	65,63	68,46	8,04	55,61	5,42
Agropecuário Inapto (ma de 20% de declividade)	7,13	7,11	7,44	-	-	-
Terras indígenas*** (TI)	108,41	108,41	108,41	12,74	86,65	9,65
Remanescente TI	106,53	106,47	106,20	12,48	84,84	9,47
Antrópico TI	1,14	12,1	1,45	-	1,18	0,12
UCPI***	52,96	52,96	52,96	6,22	37,74	5,76
Remanescente UCPI	51,11	51,16	51,04	6,00	36,38	5,59
Antrópico UCPI	0,90	0,88	0,99	-	0,62	0,10
Água	17,21	16,30	16,55	1,94	15,12	0,96
Infraestrutura	3,80	3,72	4,33	0,51	-	-
Outros	2,33	2,81	2,21	0,26	-	-

Notas: Mha – Milhões de hectares. \*Área oficial do Brasil publicada no DOU nº 38, de 23/02/2022, conforme Portaria Nº PR-73, de 21 de fevereiro de 2022. \*\*Área da Amazônia Legal calculada no shape file do projeto. A área oficial da Amazônia Legal do Brasil informada pelo IBGE para 2021 é 501,51 Mha. \*\*\*Foram utilizados os limites das terras indígenas (TI) de 2021 e das unidades de conservação de proteção integral (UCPI) de 2019 sobre os usos da terra de 2008 e 2020.

Fonte: Os autores.

As áreas com uso agropecuário no Brasil apresentam uma distribuição heterogênea (Figura 27.4). Percebe-se uma variação da distribuição entre as cinco regiões (Figura 27.4A) e entre as unidades da Federação (Figura 27.4B). Além disso, distribuem-se, preferencialmente, nos relevos com declividade entre 0 e 20% (Figura 27.4B). As exceções são os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo, que possuem a maior parte de seu uso nas declividades entre 20% e 100%.



**Figura 27.4.** Distribuição do território nacional em uso agropecuário em 2020, por unidade da Federação e por faixa de declividade, considerando: (A) à esquerda, o uso agropecuário de cada região do Brasil em relação ao total de uso agropecuário do País e à superfície da região; (B) à direita, o percentual de uso agropecuário total em relação à soma desse uso com as áreas naturais (vegetadas e não vegetadas) não protegidas em cada unidade da federação.

Fonte: Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2022c).

Quanto à razão entre a área de uso agropecuário em relação ao remanescente de vegetação nativa, excluindo-se as terras das UCPI, terras indígenas e corpos d'água, os estados da Região Norte são os que apresentam a menor antropização agropecuária, com taxas de uso das áreas não protegidas abaixo de 20%. No entanto, os estados do Pará e de Rondônia apresentam indícios de maior uso das terras de áreas não protegidas em comparação aos demais. Os estados com maior antropização estão nas regiões Centro-Oeste (GO e MS), Sudeste (MG, ES, RJ e SP), Sul (PR) e Nordeste (AL e SE). Eles apresentam mais de 60% de suas terras não protegidas com uso agropecuário. Observa-se que os estados da região do Matopiba (MA, TO, PI, BA) apresentam o maior potencial de expansão, com taxas de ocupação entre 20% e 50%. Nove estados, no total, apresentam indícios excessivos no uso agropecuário nos biomas presentes no Estado: AL, SE, PE e GO em relação ao bioma Mata Atlântica; no

bioma Cerrado o estado de SP; e, na Amazônia Legal brasileira, os estados de MT, RO, PA, TO (Tabela 27.2).

**Tabela 27.2.** Estados do Brasil com taxa de uso antrópico com indícios de superutilização das terras com o uso agropecuário.

	Estado	Total do estado (%)	Percentual de uso agropecuário no bioma do estado (%)				
			Amazônia	Caatinga	Cerrado	Mata Atlântica	Pantanal
Amazônia Legal	Alagoas	78,56	**	72,21	**	83,67*	**
	Sergipe	80,54*	**	79,75	**	80,73*	**
	Pernambuco	48,93	**	41,9	**	81,81*	**
	Paraíba	45,48	**	42,62	**	76,84	
	São Paulo	79,29	**	**	83,06*	77,4	**
	Goiás	64,96	**	**	64,47	83,73*	**
	Mato Grosso	43,83	45,42*	**	45,74		16,93
	Pará	27,72	27,46	**	35,87	**	**
	Rondônia	54,43*	54,59*	**	22,03	**	**
	Tocantins	33,62	74,03	**	28,76	**	**

Notas: \*Indícios de superutilização da terra com uso agropecuário: >80% em biomas fora da Amazônia Legal; >50% no bioma Amazônia para o estado de Rondônia por causa da flexibilização da reserva legal promovida pelo Zoneamento Ecológico Econômico; >20% nos demais estados desse bioma; e >65% nos estados dos biomas Cerrado e Pantanal na Amazônia Legal. \*\*Bioma não existente no estado.

Fonte: Os autores.

No âmbito dos domínios fitogeográficos (Tabela 27.3), os que apresentam as maiores áreas com vegetação nativa (Veg-Total) são Amazônia e Pantanal, enquanto os mais alterados pelo uso antrópico (Ant-Total) são Mata Atlântica e Cerrado. Contudo, ao analisar as áreas sob cobertura florestal, ainda existe potencial de expansão agrária em todos os domínios fitogeográficos brasileiros registrado por Soares-Filho (2013). Ressalta-se novamente a necessidade de uma política de ordenamento territorial como estratégia para a conservação da integridade dos domínios fitogeográficos e a oferta de serviços ecossistêmicos a eles associados, em face da disponibilidade de terras sob vegetação nativa e sem restrição institucional passíveis de serem convertidas para uso antrópico. Ou seja, a ocupação futura do território demanda uma ampla discussão com a sociedade como forma de orientar uma eventual ocupação territorial de forma planejada e de dar suporte aos órgãos ambientais quanto à supressão da vegetação nativa.

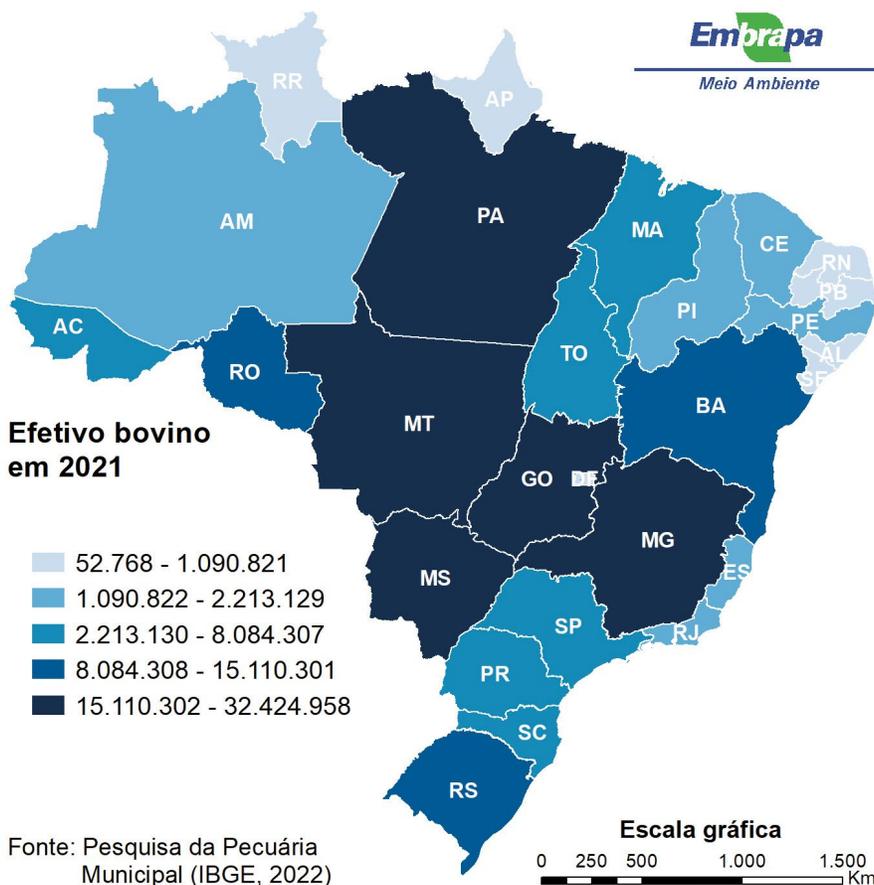
**Tabela 27.3.** Área em milhões de hectares (Mha) e percentual de terras com cobertura Veg-Agr\* e Agr-Total\* em relação à área do domínio fitogeográfico, subtraídas as áreas de água, urbana, outros usos e as áreas com restrições institucionais para o ano de 2020.

Biomassas	Área (Mha)	Veg-Total (Mha)	Ant-Total (Mha)	Veg-Agr (Mha)	Agr-Total (Mha)
Amazônia	422,82	347,58	63,07	212,47	61,67
Caatinga	85,88	53,77	30,21	51,71	30,03
Cerrado	198,25	107,97	87,42	96,08	87,03
Mata Atlântica	110,87	35,13	71,03	32,49	70,67
Pampa	18,11	8,94	8,28	8,87	8,27
Pantanal	15,10	12,11	2,44	11,37	2,39
Brasil	851,03	565,50	262,45	412,99	260,05

Notas: \*Agr-Total: uso agropecuário em áreas exógenas a terras indígenas e UCPI; Ant-Total: uso agropecuário total (antropismo), incluindo o uso em terras indígenas e UCPI; Veg-Agr: vegetação remanescente sem restrições institucionais; Veg-Total: vegetação natural total.

Fonte: Os autores.

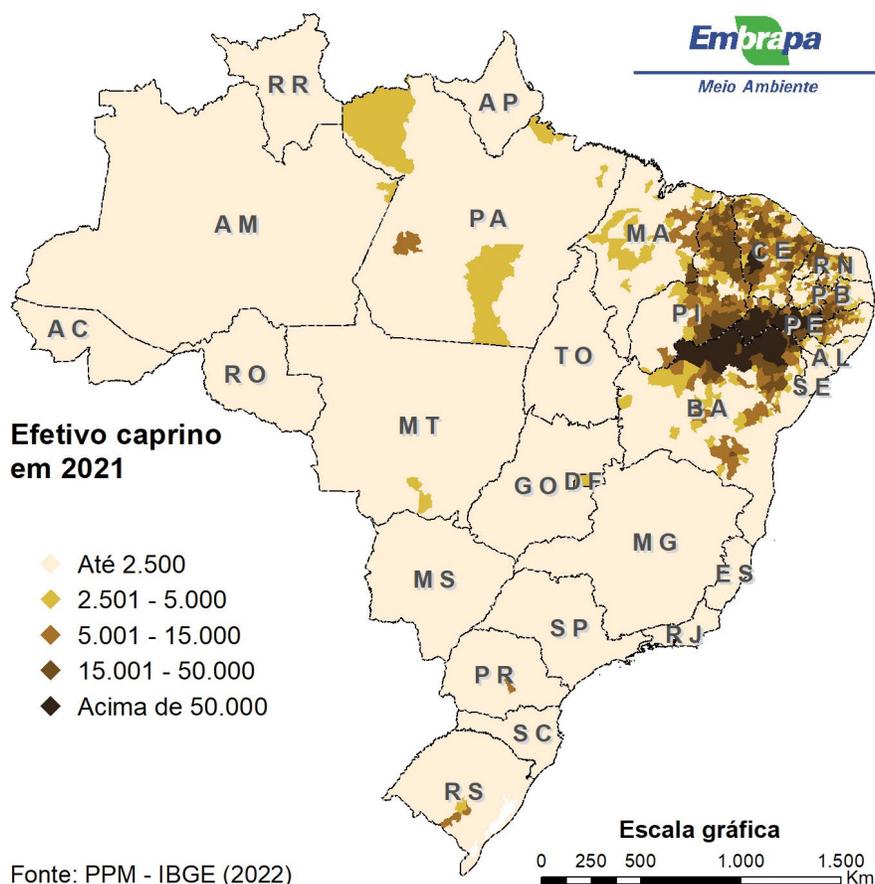
Em 2021, o efetivo bovino brasileiro foi estimado pelo IBGE em 224,6 milhões de cabeças disseminadas por todo o País (Figura 27.5). Assim como a lavoura do pequeno produtor (agropecuária, em geral), suas maiores expressões podem ser regionalizadas da seguinte forma: ocupa quase todo o estado do Mato Grosso do Sul e de Goiás; no Mato Grosso, concentra-se em grande parte no sul do Estado; no Triângulo Mineiro e nos pantanais, representa ocupação já tradicional, assim como no Pampa gaúcho; na Bahia, a ocupação destaca-se na depressão dos rios Paraguaçu e Itapecuru, na região do Médio Rio São Francisco, mais especificamente na Depressão de Guanambi e na região de Itapetininga/Vitória da Conquista, de onde se estende por terras de Minas Gerais, na região das vertentes dos rios Jequitinhonha e Pardo, acompanhando os limites entre Minas e o Espírito Santo; em Sergipe, a pecuária está disseminada em quase todo o estado; ocorrem concentrações no centro e no oeste de São Paulo, no noroeste do Paraná, na região da Campanha Gaúcha, na área de influência da BR-364 em Rondônia e no Acre, além de sua expansão pelo Pará e Tocantins, no eixo das rodovias BR-158 e PA-150. Em relação aos maiores produtores, Mato Grosso lidera com 32,42 milhões de cabeças, ou quase 14,5% do total do rebanho brasileiro. Na sequência, Goiás (24,29 milhões), Minas Gerais (22,86 milhões), Pará (23,92 milhões) e Mato Grosso do Sul (18,68 milhões) completam a lista dos cinco maiores produtores. O menor produtor é o estado do Amapá, com 52,8 mil bovinos.



**Figura 27.5.** Classes de efetivo bovino por estados do Brasil.  
Fonte: Pesquisa da Pecuária Municipal – IBGE, 2022e.

Em relação à caprinocultura brasileira, em 2019 o rebanho foi estimado em 11,3 milhões de cabeças, sendo que a Região Nordeste responde por 94,5% do efetivo nacional, com 10,7 milhões de cabeças (Magalhães et al., 2020), representadas na Figura 27.6. Em relação à ovinocultura, em 2019 estimou-se o rebanho brasileiro em um total de 19,7 milhões de cabeças, mantendo-se a tendência de concentração de rebanhos na Região Nordeste (Figura 27.6). Essa região apresenta 13,5 milhões de cabeças, equivalente a 68,54% do rebanho nacional, seguida das Regiões Sul e Centro-Oeste, com 3,9 milhões e 1,0 milhão de cabeças, respectivamente, correspondentes a 20,8% e 5,0% do rebanho ovino do Brasil (Magalhães et al., 2020).

Nos últimos anos, o setor tem se beneficiado do aumento do consumo interno e das demandas de exportação de carne e pele, além de novas oportunidades que a atividade oferece, de modo que, no período entre 2015 e 2019, houve ampliação acumulada de 17,5% no rebanho caprino e 7,09% no rebanho ovino. Apesar de reduções do efetivo em algumas regiões do País, o Nordeste destaca-se com o melhor desempenho, mostrando maior crescimento e ganho de participação em ambos os rebanhos, mantendo a tendência de expansão dos rebanhos na região, compensando a redução observada em outras regiões produtoras. Esta tendência é decorrência da capacidade de adaptação destes animais às condições climáticas adversas e do aumento da demanda nos principais centros consumidores (Magalhães et al., 2020).

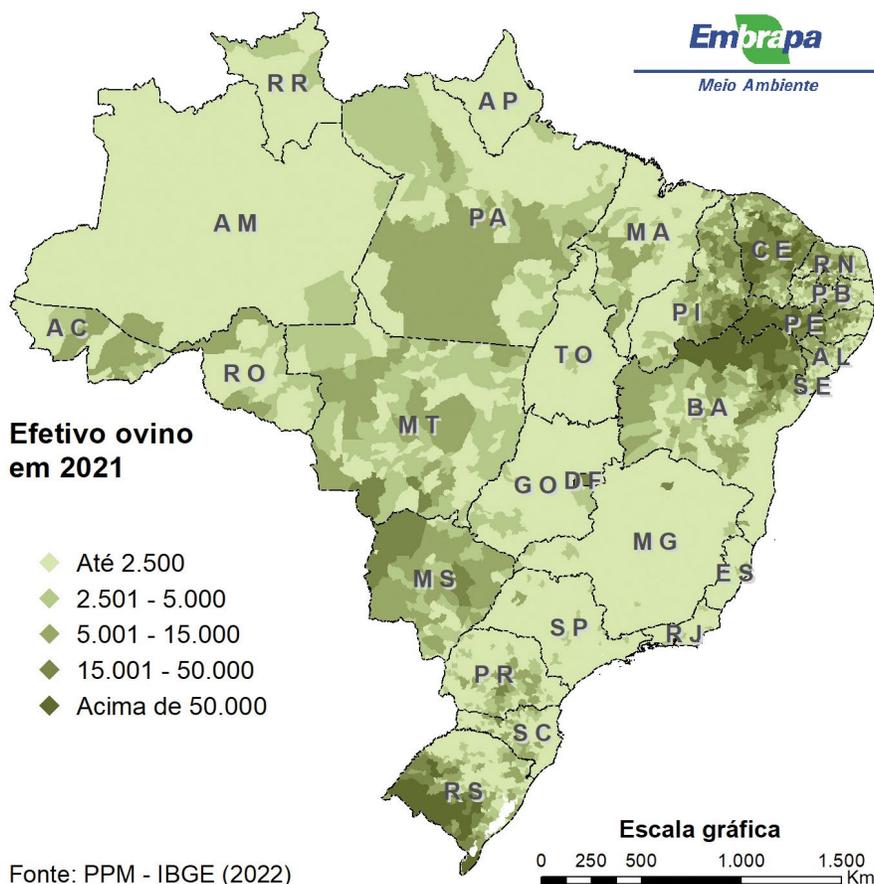


Fonte: PPM - IBGE (2022)

Figura 27.6. Efetivo de caprinos no ano de 2021.

Fonte: Pesquisa da Pecuária Municipal - IBGE (2022a)

O Brasil ocupa a 21ª posição na produção de caprinos e a 18ª na de ovinos; no entanto, ainda importa grande parte da carne de cordeiro consumida no País. Praticamente 50% dos ovinos estão concentrados na Região Nordeste (Figura 27.7), mas o Rio Grande do Sul também apresenta contribuição bastante significativa (Embrapa, 2018).



**Figura 27.7.** Classes do efetivo da pecuária ovina nos estados em 2017.  
Fonte: Pesquisa da Pecuária Municipal – IBGE (2022a)

O Brasil possui o maior rebanho comercial de bovinos do mundo, com forte expansão econômica na última década, em grande medida decorrente do aumento da eficiência produtiva e, principalmente, da competitividade conferida pelo desenvol-

vimento tecnológico do setor. De fato, ao longo das últimas duas décadas, o setor agropecuário vem se destacando pelo seu desempenho econômico com ganhos crescentes de produção e produtividade, num processo que reuniu eficiência produtiva, desenvolvimento científico e tecnológico, organização empresarial e novas formas de comercialização, com forte protagonismo do setor privado (Embrapa, 2018). Essas técnicas combinam o aumento de produtividade com o potencial efeito mitigador de GEE. Além disso, a recuperação de pastagens evita que novas áreas sejam desmatadas para a expansão da produção de bovinos.

Entretanto, mesmo considerando que esse movimento de expansão produtiva venha incorporando práticas de produção sustentável, como, por exemplo, a integração produtiva e sistemas de plantio direto, um dos principais problemas do agronegócio brasileiro ainda é a degradação das pastagens. Segundo o Atlas das Pastagens (Ferreira Júnior, 2020), aproximadamente 89 milhões de hectares dos cerca de 161 milhões de hectares de pastagens no Brasil apresentam algum estágio de degradação. Esse cenário possibilita uma grande oportunidade de redução do impacto causado pela pecuária de corte, principalmente por meio das técnicas de recuperação de pastagem e sistemas integrados de produção.

Ao longo da última década, a área de terras ocupadas com pastagens para a pecuária permaneceu relativamente estável em aproximadamente 161 Mha, porém com intensa dinâmica espacial. A distribuição espacial dessas áreas evidenciou a predominância na perda de áreas em regiões que possuem aptidão e infraestrutura para sustentar sistemas agrícolas, e no ganho de área em regiões com maior disponibilidade de terras com baixo custo, caracterizadas pelas regiões de fronteira agrícola. Uma área de aproximadamente 31,7 Mha deixou de ser mapeada como pastagem. Este resultado é um indicador de que a maior parte das áreas que estão saindo do sistema pecuário são as menos produtivas (Ferreira Júnior, 2020), o que pode ser constatado quando se converte a base de dados usada pelos autores para unidade animal (UA), pois nas últimas décadas a lotação bovina aumentou de 0,8 UA ha<sup>-1</sup> em 1985 para 0,92 UA ha<sup>-1</sup> em 2018.

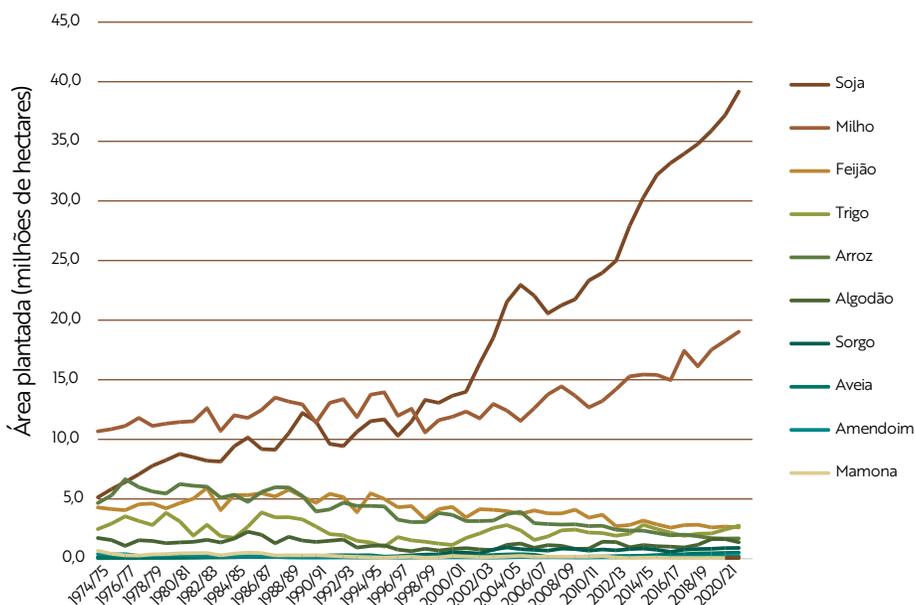
Pastagens degradadas podem ser definidas como áreas com acentuada diminuição da produtividade agrícola (diminuição acentuada da capacidade de suporte) esperada para aquela área, podendo ou não ter perdido a capacidade de manter a produtividade do ponto de vista biológico (acumular biomassa). Macedo (1995) define a degradação de pastagem como o processo evolutivo de perda de vigor, produtividade e capacidade de recuperação natural de uma dada pastagem, tornando-a incapaz de sustentar os níveis de produção e qualidade exigidos pelos animais, bem como de superar os efeitos nocivos de pragas, doenças e invasoras. Considera, ainda, que, num estágio avançado, poderá haver considerável degradação dos recursos naturais.

O uso de forrageiras adaptadas às condições locais de solo e clima, bem formadas, homogêneas, livre de invasoras, com manejo adequado à sua capacidade de

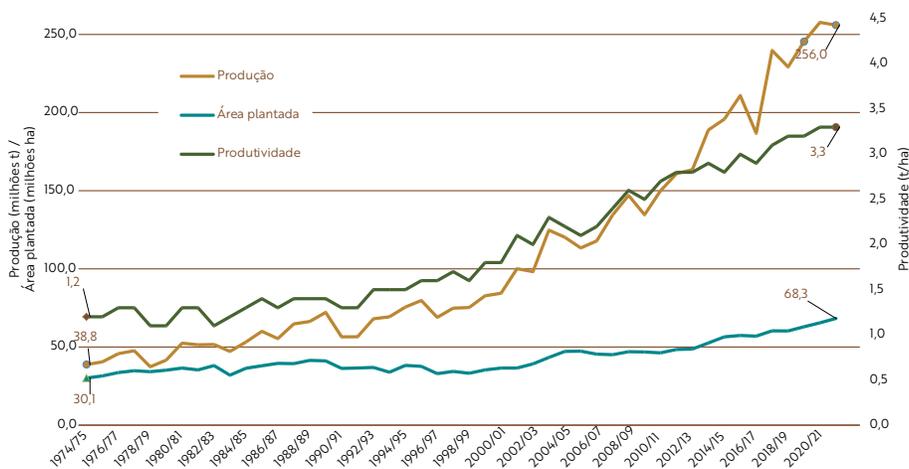
suporte e adequada correção e adubação do solo geralmente resultam no aumento da longevidade das pastagens, com produtividade econômica. Entretanto, falhas em seu manejo podem acelerar sua degradação, sendo que os extremos dessas condições conceitualmente denominados “degradação agrícola” e “degradação biológica” (Dias-Filho, 2011). Na degradação agrícola, há um aumento na proporção de plantas daninhas na pastagem, diminuindo gradualmente a capacidade de suporte. Na degradação biológica, o solo perde a capacidade de sustentar a produção vegetal de maneira significativa, levando à substituição da pastagem por plantas pouco exigentes em fertilidade do solo, ou simplesmente ao aparecimento de áreas desprovidas de vegetação (solo descoberto).

Adicionalmente, a conversão de áreas de pastagens pouco produtivas para outros usos e/ou com integração produtiva (por exemplo, Integração Lavoura Pecuária (ILP), Pecuária Floresta (IPF) ou Integração Lavoura Pecuária Florestas (ILPF) e a melhoria da produtividade das pastagens remanescentes são estratégias eficazes para aumentar a produção da agropecuária em atendimento às demandas de mercado, podendo reduzir a pressão pela abertura de novas áreas e evitando-se os impactos do desmatamento. As áreas que não apresentaram indícios de degradação concentram-se predominantemente na Amazônia – onde o processo de degradação agrícola, caracterizado pela regeneração da vegetação nativa, é intenso – e Mata Atlântica – onde a restauração da vegetação nativa ocorre com mais frequência. As áreas mapeadas como pastagens pelo Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento da Universidade Federal de Goiás (Lapig/UFG) em 2018 foram classificadas em três categorias: áreas estáveis, que não apresentaram mudanças quanto à presença ou ausência de indícios de degradação; áreas com mudanças, que apresentaram mudanças quanto aos indícios de degradação; e novas áreas, aquelas não mapeadas como pastagem em 2010, mas sim em 2018. A área analisada somou 166,9 Mha, sendo que aproximadamente 2,2% da área mapeada não foi analisada por indisponibilidade de dados.

Quanto ao cultivo de grãos, sua evolução pode ser observada na Figura 27.8, que apresenta a evolução da área plantada com os principais cultivos no período de 1974 a 2021 e ilustra a tendência de crescimento sistemático da produção da agropecuária brasileira, notadamente em decorrência de ganhos de produtividade a partir da década de 1990. Ao avaliar o comportamento histórico da produção de grãos no período de 1974 a 2021, considerando a área e a produtividade (Figura 27.9), observa-se que, enquanto a área aumentou 126,5% (era 55,9% em 2008), a produção cresceu 560,3% (tinha sido 279,1% em 2008). Assim, a tendência tem se mantido, com crescimento da produtividade durante todo o período considerado, com quedas verificadas entre 2004 e 2006 devido a ocorrência de estiagem, porém o indicador de produtividade para grãos passou do valor médio de 1.500 kg ha<sup>-1</sup>, em 1992, para 3.500 kg ha<sup>-1</sup> em 2021, com uma taxa total de aumento de produtividade de 1,68% em relação a 2017.



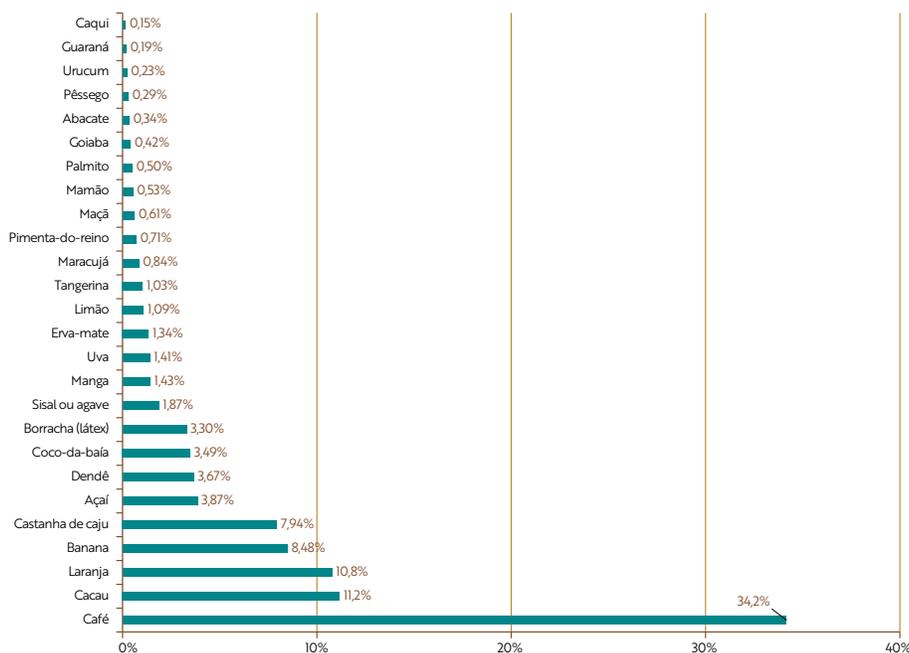
**Figura 27.8.** Evolução da área plantada com grãos no Brasil nas safras de 1974/75 a 2021/22.  
Fonte: Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2022b).



**Figura 27.9.** Evolução da área cultivada (verde), da produção (azul) e da produtividade (vermelho) de grãos no Brasil nas safras de 1974/75 a 2020/21.  
Fonte: Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2022b).

Destaca-se, entretanto, que os ganhos de produtividade coincidentemente foram observados em culturas típicas de uma agricultura industrial, integrada a uma cadeia de conhecimento e investimento forte, bem como a demandantes específicos, particularmente a indústria de carne, que tem se adequadamente melhor a cada dia ao uso de organismos geneticamente modificados, em especial a soja, o milho e o algodão, uma commodity tipicamente industrial.

Das lavouras permanentes, destacam-se, pelos aumentos de produção, os cultivos de café, laranja, cacau, banana, castanha de caju, açaí, coco-da-baía, borracha (látex) e dendê. De acordo com dados dos censos agropecuários do IBGE de 2006 e 2017, essas lavouras apresentaram acréscimos em torno de 80% na sua produção no período, com destaque de crescimento para a borracha (+639%) e para a palma de óleo – dendê (+252%). A Figura 27.10 apresenta dados sobre o painel da área plantada, em 2021, para as principais lavouras permanentes.

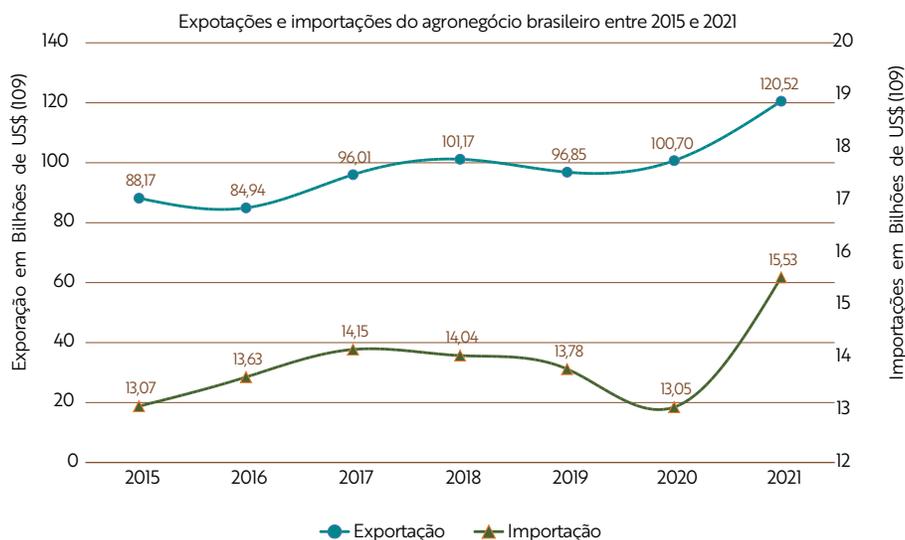


**Figura 27.10.** Área plantada com lavouras permanentes no Brasil em 2021.

Fonte: Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2022c).

A evolução das últimas duas décadas do agronegócio consolidou o Brasil como um dos principais atores no mercado internacional de commodities agropecuárias, conquistando o segundo lugar entre os atores do comércio internacional. A produ-

ção de alimentos com baixo custo e qualidade comprovada fez com que o país esteja sendo considerado como um dos principais centros fornecedores de alimentos ao mundo, com um marcante e contínuo crescimento das exportações (Figura 27.11), representando 43% do mercado externo brasileiro, com exportações da ordem de US\$ 120,6 bilhões, importações de US\$ 15,5 bilhões e saldo de US\$ 105,1 bilhões em 2021 (Kreter, 2022).



**Figura 27.11.** Evolução comparativa das exportações e importações do agronegócio brasileiro entre 2015 e 2021.

Fonte: Brasil (2022).

A análise da evolução da década de 2010 à de 2020 revela a diminuição da demanda por incorporação de novas terras ao processo produtivo no país como decorrência do aumento da produção agrícola, em razão dos ganhos de produtividade e da intensificação produtiva verificada no setor agropecuário. Embora nos últimos 3 anos tenha se observado uma retomada no desmatamento de novas áreas nos biomas Amazônia e Cerrado, por motivos diversos o País pode resgatar eventuais passivos ambientais sem afetar a produção e a oferta de alimentos, fibras e energia, desde que políticas de renda sejam implementadas.

## A QUESTÃO AMBIENTAL: AGRICULTURA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

De acordo com o Painel Intergovernamental para a Mudança de Clima - IPCC (Houghton, 2001), os processos industriais, transportes, geração de energia elétrica e aquecimento doméstico que utilizam combustíveis fósseis para a geração de energia, assim como as queimadas e supressão de florestas e uso do solo (LUC), emitem grandes quantidades de poluentes climáticos para a atmosfera. Tais atividades humanas estão entre as principais causas das mudanças climáticas como consequência do aumento da concentração atmosférica de GEEs – gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso (NO) –, o que aumenta a preocupação global com as questões ambientais, como decorrência da incidência, cada vez mais frequente, de eventos climáticos extremos como chuvas intensas, secas e veranicos, com reflexos, ainda, nas exigências dos mercados em relação à sustentabilidade dos processos produtivos.

No Brasil, como no mundo, a agropecuária é responsável por grande parte da emissão de GEEs, contribuindo significativamente para as mudanças climáticas com emissões da ordem de um quinto a um quarto das emissões globais de  $\text{CO}_2$ , geradas pelas atividades agrícolas dentro da propriedade rural, pelas emissões entéricas da pecuária e mudanças de uso das terras (Mbow et al., 2019). A agropecuária também responde por quase 50% das emissões de  $\text{CH}_4$  no mundo e 75% do total de emissões de óxido nitroso (NO) (Tubiello et al., 2022).

Tubiello et al. (2022) estimaram as emissões globais de GEEs dos sistemas agroalimentares nos anos de 1990 e 2019 e observaram que o principal responsável pelo incremento nas emissões de GEEs do setor nos últimos anos foi o aumento das emissões nos processos de pré e pós-produção, enquanto as emissões do uso das terras diminuíram em 25% e as emissões nos sistemas produtivos dentro da propriedade rural aumentaram cerca de 9%. Os autores relataram emissões da ordem de 16,5 bilhões de toneladas métricas ( $\text{Gt CO}_2 \text{ eq ano}^{-1}$ ), correspondendo a 31% do total de emissões antrópicas em 2019. Do total dessas emissões, a produção agrícola e pecuária nas propriedades rurais, incluindo o uso de energia, responderam por 7,2  $\text{Gt CO}_2 \text{ eq ano}^{-1}$ ; mudanças de uso da terra devido ao desmatamento e à drenagem de solos orgânicos responderam por 3,5  $\text{Gt CO}_2 \text{ eq ano}^{-1}$ ; as emissões de processos de pré e pós-produção (fabricação de fertilizantes, processamento de alimentos, embalagem, transporte, varejo, consumo doméstico e descarte de resíduos alimentares) foram responsáveis por 5,8  $\text{Gt CO}_2 \text{ eq ano}^{-1}$ , com um aumento de cerca de 17% em relação ao ano de 1990 e tendência de estabilização a partir do ano 2006. Segundo os autores, as emissões de  $\text{CO}_2$  dos processos de pré e pós-produção responderam por 3,9  $\text{Gt CO}_2 \text{ ano}^{-1}$ , sendo maiores que as emissões de mudança de uso da terra (3,3  $\text{Gt CO}_2 \text{ ano}^{-1}$  em 2019) e as emissões dos sistemas produtivos dentro da propriedade rural (1,2  $\text{Gt CO}_2 \text{ ano}^{-1}$ ). En-

tretanto, as atividades produtivas dentro da propriedade rural são a principal fonte de emissão de metano ( $140 \text{ Mt CH}_4 \text{ ano}^{-1}$ ) e de óxido nitroso ( $7,8 \text{ Mt N}_2\text{O ano}^{-1}$ ), enquanto pré e pós-processos emitiram  $49 \text{ Mt CH}_4 \text{ ano}^{-1}$  de metano, gerados principalmente a partir da decomposição de resíduos sólidos de alimentos em aterros sanitários e a céu aberto em lixões (Tubiello et al., 2022).

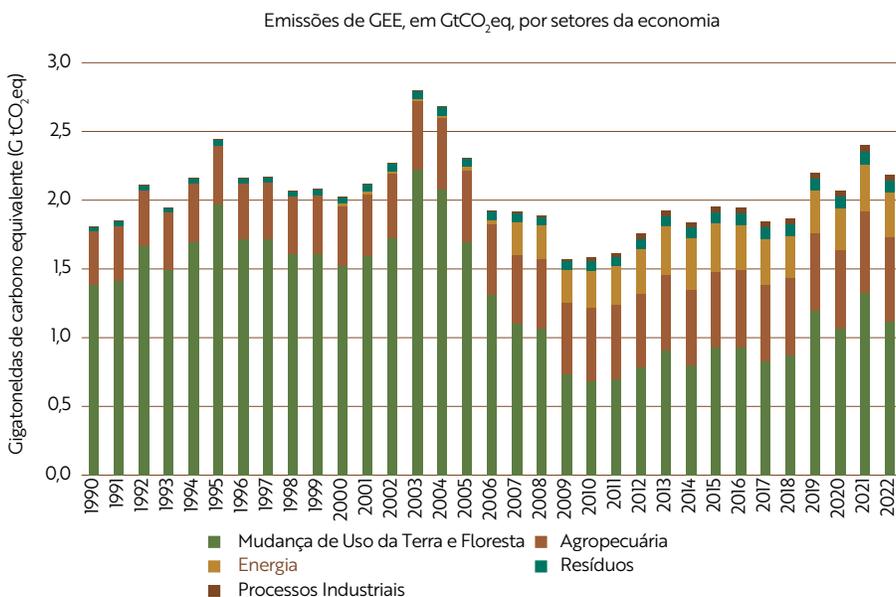
Em termos globais, as emissões de GEEs associadas aos sistemas agroalimentares indicam que a China é a principal emissora com cerca  $1,9 \text{ Gt CO}_2 \text{ eq ano}^{-1}$ , seguida pela Índia, Brasil, Indonésia e EUA, cada um com emissões entre  $1,2 \text{ Gt CO}_2 \text{ eq ano}^{-1}$  e  $1,3 \text{ Gt CO}_2 \text{ eq ano}^{-1}$ ; República Democrática do Congo (RDC) e Federação Russa seguem com cerca de  $0,5 \text{ Gt CO}_2 \text{ eq ano}^{-1}$  ou  $0,6 \text{ Gt CO}_2 \text{ eq ano}^{-1}$ ; e Paquistão, Canadá e México, todos na faixa de  $0,2 \text{ Gt CO}_2 \text{ eq ano}^{-1}$  a  $0,3 \text{ Gt CO}_2 \text{ eq ano}^{-1}$ . Enquanto a China e a Índia praticamente não contribuem com emissões relacionadas à mudança no uso das terras, este é o principal componente das emissões do Brasil, maior emissor global com  $663 \text{ Gt CO}_2 \text{ eq ano}^{-1}$ , seguido por Indonésia e RDC (Tubiello et al., 2022).

As perdas históricas de C devido a uso e mudanças de uso do solo foram estimadas em  $148 \text{ Pg C}$  ( $1 \text{ Pg} = 1 \text{ bilhão de toneladas}$ ) entre 1870 e 2014 (Sá et al., 2017). Desse total, a América do Sul, que dispõe de solos com cerca de 10,3% do estoque de carbono orgânico do solo do mundo ( $160 \text{ Pg C}$  a  $1 \text{ m}$  de profundidade), sendo que suas emissões anuais de C provenientes da combustão de combustíveis fósseis e da produção de cimento representam apenas 2,5% ( $0,25 \text{ Pg C}$ ) do total de emissões globais ( $9,8 \text{ Pg C}$ ), entretanto as emissões oriundas do uso e mudanças de usos das terras contribuíram com 31,3% ( $0,34 \text{ Pg C}$ ) das emissões globais anuais de gases de efeito estufa ( $1,1 \text{ Pg C}$ ).

Nesse contexto, observa-se que, historicamente no Brasil (Figura 27.12), os grandes desafios relacionados ao controle das emissões de GEEs concentram-se no setor de mudança do uso da terra (e desmatamento) e agropecuária, que responderam por 46,2% ( $998 \text{ Mt de CO}_2 \text{ eq}$ ) e 26,7% ( $577 \text{ Mt de CO}_2 \text{ eq}$ ), respectivamente, do total das emissões líquidas de gases de efeito estufa do país em 2020, que foi da ordem de  $2,16 \text{ Mt de CO}_2 \text{ eq}$ , quantidade superior às emissões de 2019,  $1,97 \text{ Mt de CO}_2 \text{ eq}$ . Trata-se, ainda, do maior nível de emissões desde o ano 2006. Os processos industriais emitiram cerca de 5% do total ( $100 \text{ Mt CO}_2$ ), e o setor de resíduos,  $92 \text{ Mt de CO}_2 \text{ eq}$  ou 4% das emissões brutas (SEEG, 2022a).

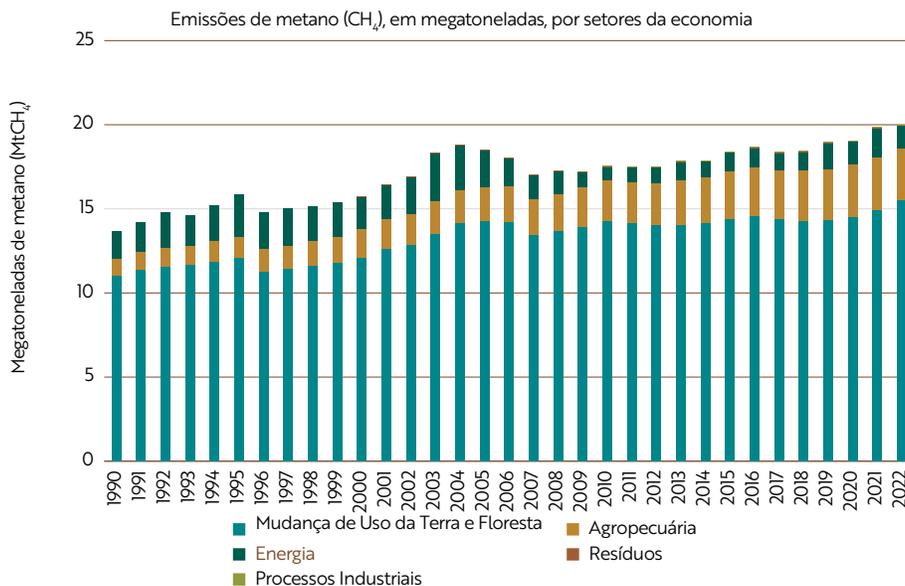
Embora a agropecuária contribua também com remoções de GEEs no Brasil, é o setor responsável pela principal fonte de emissão metano ( $\text{CH}_4$ ), proveniente principalmente do processo de fermentação entérica dos ruminantes. O  $\text{CH}_4$  é um gás de efeito estufa com um grande efeito no aquecimento global, estimado em 28 vezes ao do  $\text{CO}_2$  ( $1 \text{ t de CH}_4 \text{ equivale a } 28 \text{ t CO}_2$  – *Global Warming Potential* – GWP 100). Segundo a Quarta Comunicação Nacional à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (Brasil, 2021b), as emissões de metano vêm subindo gradativamente desde 2008, sendo que, em 2015, 76,1% das emissões de metano foram provenientes

do setor agropecuário, e, destes, cerca de 91,5% corresponde a metano entérico. As demais emissões estão relacionadas principalmente ao manejo de dejetos de animais (3,7%) e do cultivo de arroz irrigado (2,2%).



**Figura 27.12.** Emissões de GEE, em Gt CO<sub>2</sub> eq, por setores da economia entre 1990 e 2020, Fonte: adaptado de SEEG (2022a).

Estimativas mais recentes do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2022a) indicam que as emissões brasileiras de metano foram da ordem de 20,2 milhões de toneladas em 2020 (Figura 27.13), o que corresponde a 565 MtCO<sub>2</sub>, ou 26% das emissões totais de gases de efeito estufa do País. A principal fonte de emissões é a agropecuária, com 71,8% das emissões, seguida do tratamento de resíduos, com 15,8%, e das mudanças de uso da terra, 8,7%. Energia e processos industriais contribuíram com 3,8% das emissões.



**Figura 27.13.** Emissões de metano (CH<sub>4</sub>) no Brasil, em toneladas, por setores da economia entre os anos de 1990 e 2020.

Fonte: adaptado de SEEG (2022a).

Entretanto, ao se analisar a evolução das contribuições setoriais para emissões de metano no setor agropecuário, de 1990 até 2020 as emissões totais de metano oriundas da fermentação entérica do rebanho bovino aumentaram 34,2% (de 9,92 Mt CH<sub>4</sub> para 13,32 Mt CH<sub>4</sub>) enquanto o rebanho cresceu 48,3%, passando de 147,1 milhões para 218,2 milhões de cabeças (SEEG, 2022b). Da mesma forma, com base nos dados da Quarta Comunicação Nacional, verifica-se que desde 1990 houve uma redução de cerca de 9% das emissões de CH<sub>4</sub> entéricas por unidade animal, o que certamente está relacionado à melhoria de sua eficiência produtiva, decorrente, por exemplo, da melhoria genética do rebanho e das plantas forrageiras, do conforto animal, do uso de tecnologias para o tratamento de dejetos, entre outras ações. O emprego dessas tecnologias no campo ajudou no aumento da digestibilidade dos capins e no uso eficiente das pastagens, com reflexos no ganho de peso e na redução da idade de abate dos animais (Brasil, 2021a).

Nessa linha, Silva et al. (2022) destacam que vários estudos e relatórios oficiais indicam a necessidade de ajustes e investimentos para o agronegócio brasileiro: a expansão agropecuária em áreas de pastagens; a adoção em grande escala de práticas

de baixas emissões de carbono (intensificação moderada da bovinocultura de corte, ampliação de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, sistemas de plantio direto e o uso de cultivares que realizam a fixação biológica do nitrogênio); fortalecimento da extensão rural e capacitação técnica de produtores rurais; criação de mecanismos de valoração de carbono; fomento à economia de floresta tropical; incremento ao uso de biocombustíveis; cooperação internacional e difusão da economia de baixo carbono. Ressaltam, ainda, que apesar de o Brasil ter uma das legislações ambientais mais modernas do mundo, necessita implementar, na prática, as ações normativas que regem os processos de preservação/conservação dos recursos naturais, em atendimento às exigências econômicas crescentes do mercado interno e externo em relação à sustentabilidade dos ecossistemas.

Concluindo, a gestão dos sistemas agroalimentares deve adotar práticas e ações que intensifiquem as funções ecossistêmicas e integrem os sistemas naturais que fazem todo o sentido nos sistemas produtivos, com ganhos de produção e produtividade, redução de custos e resiliência dos cultivos, rumo a um novo modelo de desenvolvimento baseado na economia de baixo carbono.

## A AGRICULTURA DE BAIXA EMISSÃO DE CARBONO NO BRASIL

Práticas de uso sustentável da terra que mantenham e/ou aumentem os estoques de carbono no solo e nas paisagens agrícolas podem fornecer uma série de benefícios adicionais que são essenciais para o desenvolvimento sustentável. A agricultura pode contribuir através da adoção de sistemas produtivos capazes de mitigar suas emissões de GEE. Nesse sentido, mitigar significa intervenção antrópica no sentido de desenvolver sistemas que reduzam as emissões ou aumentem os drenos de GEEs (Metz et al., 2005). Ou seja, abordagens produtivas que considerem as paisagens naturais para a mitigação das mudanças climáticas, incluindo conservação, gestão sustentável e restauração de florestas naturais, pastagens, conservação dos solos, integração produtiva, manejo de resíduos, bioinsumos, manejo dos rebanhos, entre outras, podem aumentar a resiliência dos ecossistemas e sistemas produtivos, contribuindo ainda para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

Portanto, a Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (ABC) é aquela capaz de reduzir as emissões de GEEs provenientes dos sistemas agroalimentares através de práticas agrícolas e tecnológicas capazes de diminuir ou mitigar as emissões nos processos produtivos. No Brasil, como maior emissor global de GEEs relacionados à LUC e sistemas agropecuários, a implementação da ABC para reduzir suas emissões justifica-se tanto pelas exigências do mercado quanto pela percepção de que as mudanças climáticas podem provocar impactos consideráveis para o setor, trazendo novos desafios ao seu crescimento.

Para a agropecuária, as externalidades negativas relacionadas às emissões associadas às LUC e sistemas agropecuários podem fragilizar a imagem do setor, com reflexos no acesso e manutenção de mercados; por outro lado, representam uma excelente oportunidade para reduzir emissões ou mesmo recompor os estoques de carbono que foram liberados ao longo das últimas décadas. E tal recomposição deverá ser contabilizada para o cumprimento dos compromissos internacionais de redução de emissões que o Brasil assumiu voluntariamente por meio do Plano ABC, ratificados e ampliados em 2016 na COP-21, em Paris.

O Brasil tem sido protagonista nas discussões internacionais sobre desenvolvimento sustentável desde o evento Rio 92, sendo o primeiro país, entre os 150 signatários, a assinar a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), reconhecendo que os efeitos das mudanças climáticas representam uma preocupação compartilhada por toda a humanidade. Em 2009, o compromisso do Brasil com a sustentabilidade foi consolidado através do PNMC (Plano Nacional sobre a Mudança do Clima), assumindo-se ainda compromissos de forma voluntária na COP 15 e, posteriormente, com Metas Nacionalmente Apropriadas (NDCs) perante a UNFCC no Acordo de Paris, ratificado pelo Decreto nº 9.073 (Brasil, 1998). Durante a conferência, o governo brasileiro estabeleceu um compromisso de redução de suas emissões de GEE na faixa entre 36,1% e 38,9%, em relação às emissões brasileiras projetadas até 2020. Para tal, propôs inicialmente um programa de ações voluntárias, com a finalidade de reduzir em 80% e 40% a taxa de desmatamento na Amazônia e no Cerrado, respectivamente; adotar, na agricultura, a recuperação de pastagens degradadas promovendo práticas como a integração lavoura-pecuária-florestas (ILPF); ampliar o Sistema Plantio Direto (SPD) e a Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN); aumentar a eficiência energética, o uso de bicombustíveis, a oferta de energia de hidrelétrica e de fontes alternativas de biomassa, de energia eólica e de pequenas centrais hidrelétricas, assim como expandir o uso de carvão de florestas plantadas na siderurgia.

Esse foi o contexto em que foi elaborada a primeira fase do Plano Setorial de Mitigação e Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – Plano ABC 2010—2020 (Brasil, 2012), uma iniciativa estratégica e pioneira para conciliar a segurança alimentar com a sustentabilidade ambiental. O Plano ABC possui como princípios básicos a baixa emissão e/ou a mitigação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no uso e manejo da terra, em decorrência da adoção das melhores práticas de gestão agrícola, e o alto potencial de sequestro de C com a adoção de sistemas integrados de lavoura-pecuária-floresta (Sá et al., 2017).

Para o setor agropecuário, o Plano ABC significou o maior plano de fomento a tecnologias sustentáveis de produção do mundo, consolidando a estratégia de adotar sistemas adequados às diversas realidades do produtor rural, e de estabelecer indica-

dores e métricas relativas à redução e mitigação das emissões de GEEs do setor, como forma de informar e prestar contas à sociedade e aos organismos multilaterais acerca dos resultados das políticas públicas relacionadas às mudanças climáticas.

O plano contou ainda com recursos do crédito rural por meio do Programa ABC para incentivo à adoção das tecnologias de baixa emissão de carbono pelos agricultores, além de ações de fomento, treinamento e disseminação das práticas e das tecnologias ABC. Foi composto por sete programas, seis deles referentes às tecnologias de mitigação e o último com ações de adaptação às mudanças climáticas: recuperação de pastagens degradadas (RPD); integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e sistemas agroflorestais (SAF); sistema plantio direto (SPD), fixação biológica do nitrogênio (FBN); florestas plantadas (FP); tratamento de dejetos animais.

A previsão inicial para a implementação de todas as atividades previstas no Plano ABC era da ordem de R\$ 197 bilhões, sendo R\$ 157 bilhões de recursos via crédito rural e R\$ 33 bilhões de recursos do Tesouro Nacional para equalização. Entretanto, de 2010/2011 a 2019/2020 os recursos totais disponibilizados para o Programa ABC somaram R\$ 19,6 bilhões, tendo a recuperação de pastagens degradadas, o SPD e a ILPF como as práticas que demandaram recursos (Tabela 27.4).

**Tabela 27.4.** Número de contratos, valores disponibilizados e aplicados pelo Programa ABC entre 2010 a 2019.

Total Geral do Programa ABC por Ano-Safra					
Período	Contratos	Valor Desembolsado (R\$) Mil	Disponibilizado pela Linha de Crédito (R\$) Bi	média (R\$ 1.000,00/ contrato)	% do Valor médio dos contratos
2010–2011	1.290	418.300,00	2,00	324,26	-
2011–2012	5.038	1.515.995,40	3,15	300,91	-7,2%
2012–2013	4.961	2.864.753,83	3,40	577,45	91,9%
2013–2014	5.882	2.695.119,38	4,50	458,20	-20,7%
2014–2015	8.018	3.656.402,33	4,50	456,02	-0,5%
2015–2016	3.344	2.052.466,03	3,00	613,78	34,6%
2016–2017	1.808	1.220.934,51	2,99	675,3	10,0%
2017–2018	2.460	1.617.716,69	2,13	657,61	-2,6%
2018–2019 (de Jul-Jan)	1.470	1.264.236,91	2,00	860,03	30,8%
<b>Total Geral</b>	<b>34.271</b>	<b>17.305.925,08</b>	<b>27,67</b>	<b>504,97</b>	<b>-</b>

Fonte: Brasil (2021a).

Ressalta-se que os investimentos na adoção dos sistemas produtivos ABC nas propriedades rurais foram diferentes do crédito para itens específicos financiáveis. Ou seja, ao financiar sistemas produtivos, e não apenas itens necessários ao custeio ou

outras formas de investimento, o Programa ABC fomentou a estruturação da adoção de sistemas produtivos com tecnologias de baixo carbono com retorno a médio e longo prazo, característica inédita no Sistema Nacional de Crédito Rural. Segundo a Agroicone (Lima et al., 2021), os recursos do Programa ABC foram destinados principalmente para correção do solo, formação e recuperação de pastagens, florestamento e reflorestamento, aquisição de bovinos e cana-de-açúcar. Os dois primeiros itens financiados representaram 56% de todo o recurso alocado no Programa ABC entre 2013/2014 e 2019/2020. De acordo com os dados do Banco Central, 70% dos tomadores de financiamento do Programa ABC foram médios produtores rurais.

Embora os investimentos do programa tenham sido bastante aquém das previsões estabelecidas, ele atendeu praticamente todas as metas de expansão da adoção e todas as metas de mitigação de GEEs. Assim, o período de 2010 a 2020 foi responsável pela adoção de tecnologias e sistemas de produção de comprovado potencial mitigador dos gases GEE em 53,76 milhões de ha, com mitigação da ordem de 192,65 milhões de Mg CO<sub>2</sub> eq no mesmo período (Tabela 27.5).

Tabela 27.5. Metas e resultados alcançados pelo Plano ABC, no período de 2010 a 2020.

	RPD	ILPF	SPD	FBN	FP	TDA	Total	
<b>METAS</b>	Compromissos (Mha) <sup>a</sup>	15,0 <sup>a</sup>	4,0 <sup>a</sup>	8,0 <sup>a</sup>	5,5 <sup>a</sup>	3,0 <sup>a</sup>	4,4 <sup>c</sup>	35,5 <sup>a</sup>
	Potencial estimado de mitigação <sup>b</sup> (milhões Mg CO <sub>2</sub> eq)	83 a 104	18 a 22	16 a 20	10	NE**	6,9	132,9 a 162,9
<b>RESULTADOS</b>	Expansão da adoção no período	26,80 <sup>a</sup>	10,76 <sup>a</sup>	14,59 <sup>a</sup>	11,78 a 6	1,88 <sup>a</sup>	38,34 <sup>c</sup>	53,76
	Expansão computada para mitigação	9,50	NE	NE	NE	NE	NE	-
	Superação da meta atingida em relação à meta estimada (%)	179	269	182	214	63	871	276
	Fator de emissão (Mg CO <sub>2</sub> eq ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	3,79	3,79	1,83	1,83	4,69	1,56	-
	Mitigação <sup>d</sup> (milhões Mg CO <sub>2</sub> eq)	36,01	39,76	26,70	21,56	8,82	60,00	192,65
	Superação da meta atingida em relação à meta estimada (%)	35	185	133	216	-	867	118

Notas: (A) Mha = milhões de hectares; (B) Potencial de mitigação previsto em função da adoção das tecnologias do Plano ABC para serem atingidas no período de 2010 a 2020; (C) em milhões m3; (D) mitigação calculada em função da expansão da tecnologia ABC no período avaliado; NE = não existe.

Fonte: Adaptado de Manzatto et al., 2020 e Brasil, 2021a.

Esses resultados demonstraram a eficiência da política pública, única em seu gênero e escopo, para o avanço da sustentabilidade da agropecuária nacional, bem como o potencial do país em implementar e cumprir seus compromissos nacionais de redução das emissões líquidas totais de gases de efeito estufa. O fortalecimento dessas estratégias produtivas da pecuária, no período considerado pelo estudo, foi de 66% para RPD e 86% para ILPF, com uma taxa média de crescimento anual de 7,5% e 9,2%, respectivamente. Com base nesses resultados, Manzatto et al. (2020), projetou para 2030 uma expansão da ordem de 22 milhões e 30 milhões de hectares de áreas produtivas com RPD e ILPF, respectivamente – o suficiente atender as metas do Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária 2020—2030 (Plano ABC+) (Tabela 27.6) e para demonstrar as importantes contribuições do setor agropecuário brasileiro em atender os compromissos assumidos nas NDCs.

Foi exatamente o impacto dessa política pública motivou o governo brasileiro a lançar em 2021 o Plano ABC+, como uma continuação ampliada de sua política setorial para enfrentamento à mudança do clima no setor agropecuário, para o período de 2020 a 2030. O plano tem como objetivo geral promover a adaptação à mudança do clima e o controle das emissões de GEEs na agropecuária brasileira, com aumento da eficiência e resiliência dos sistemas produtivos, considerando uma gestão integrada da paisagem. As metas previstas pretendem ampliar a área de adoção de Sistemas Produtivos Sustentáveis (SPS<sub>ABC</sub>) em 72,68 milhões de hectares; aumentar em 208,40 milhões de m<sup>3</sup> o tratamento de resíduos animais; estimular a utilização de bioinsumos e plantas benéficas para melhorar o uso eficiente de água e para adicionar nutrientes nas culturas agrícolas, com potencial de evitar a emissão de 23,4 milhões de Mg CO<sub>2</sub> eq; e abater 5 milhões adicionais de bovinos em terminação intensiva, com uma estimativa de capacidade de mitigação equivalente a 1.042,41 milhões de Mg CO<sub>2</sub> eq (Tabela 27.6).

Tabela 27.6. Metas do Plano ABC+ para o período de 2020 a 2030.

	<p><b>RECUPERAÇÃO DE PASTAGENS</b> Práticas agrícolas para recompor o vigor das forrageiras e aumentar a cobertura vegetal do solo, Meta: 30 milhões ha Potencial – 113,70 milhões de Mg CO<sub>2</sub>eq</p>
	<p><b>SISTEMA PLANTIO DIRETO</b> Técnicas para evitar o revolvimento do solo, mantendo-o com cobertura morta ou cobertura vegetal. Meta: 12,5 milhões ha Potencial – 12,990 milhões de Mg CO<sub>2</sub>eq</p>
	<p><b>SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO</b> Sistemas de produção integradas envolvendo a produção de grãos, fibras, madeira, energia, leite ou carne na mesma área. Meta: 10,10 milhões ha Potencial – 72,10 milhões de Mg CO<sub>2</sub>eq</p>
	<p><b>FLORESTAS PLANTADAS</b> Reflorestamento com espécies nativas ou exóticas para fins ambientais ou comerciais. Meta: 4 milhões ha Potencial – 510 milhões de Mg CO<sub>2</sub>eq</p>
	<p><b>BIOINSUMOS</b> Microrganismos e plantas benéficos para melhorar o uso eficiente de água e para adicionar nutrientes nas culturas agrícolas. Meta: 13 milhões m<sup>3</sup> Potencial – 23,4 milhões de Mg CO<sub>2</sub>eq</p>
	<p><b>MANEJO DE RESÍDUOS ANIMAIS</b> Diminui a dependência externa de fertilizantes e energia. É fonte complementar de renda. Meta: 208,4 milhões ha Potencial – 277,8 milhões de Mg CO<sub>2</sub>eq</p>
	<p><b>SISTEMAS IRRIGADOS</b> Reduzir a vulnerabilidade dos sistemas produtivos aos períodos de seca e ao risco de perda de safra. Meta: 3 milhões ha Potencial – 50 milhões de Mg CO<sub>2</sub>eq</p>
	<p><b>TERMINAÇÃO INTENSIVA</b> Promover o melhor uso dos recursos forrageiros e reduzir o tempo de abate. Meta: 5 milhões de cabeças Potencial – 16,25 milhões de Mg CO<sub>2</sub>eq</p>

Fonte: elaborado pelos autores com base em Mapa (2022).

Aderente em parte aos propósitos do Plano ABC+, durante a 26ª Conferência das Partes (COP-26) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, ocorrida em 2021 em Glasgow, Escócia, o Brasil aderiu ao Compromisso Global de Metano (CGM). Esta é uma iniciativa promovida pelos Estados Unidos e União Europeia, com adesão de mais de 110 países, que se comprometem a trabalhar juntos para reduzir coletivamente, até 2030, as emissões antropogênicas globais de metano em todos os setores emissores em, pelo menos, 30% abaixo dos níveis de 2020. No setor agropecuário, as ações deverão estar relacionadas tanto ao Compromisso do Metano quanto aos compromissos no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas para a Mudança Climática e do Acordo de Paris, além de compatíveis com a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), Lei nº 12.187 de 2009.

Embora não tenham sido estabelecidas metas para os países, o compromisso é conjunto, envolvendo ações para a redução nos setores de energia, resíduos e redução das emissões agropecuárias através da adoção de SPS<sub>ABC</sub> e de tecnologias que promovam a redução de emissões entéricas em ruminantes, principal fonte de emissão no Brasil, bem como incentivos e parcerias com agricultores. Por exemplo, sistemas de produção e terminação animal intensivos, através da melhoria da qualidade das pastagens, dos sistemas integrados de produção, do semiconfinamento e confinamento, resultam na redução das emissões por carcaças produzidas, devido ao menor tempo de vida do gado bovino para o abate.

Nesse sentido, Berndt et al. (2013) destacam que a adoção da intensificação produtiva pode diminuir em até 30% as emissões de metano por quilo de carne produzida, mesmo havendo um aumento nas emissões diárias de metano pelos animais. Da mesma forma, Cardoso et al. (2016) relatam que a melhoria da qualidade das pastagens com uso de fertilizantes, leguminosas forrageiras e fornecimento de suplementos e concentrados na produção e terminação intensiva de bovinos de corte pode aumentar em até 51% a produção de carcaças por rebanho e reduzir em 49,6% as emissões – de 58,3 kg CO<sub>2</sub> eq kg<sup>-1</sup> para até 29,4 kg CO<sub>2</sub> eq kg<sup>-1</sup> por carcaça. Com base nessas premissas, a meta, definida pelo Plano ABC+, de promover o melhor uso dos recursos forrageiros e reduzir o tempo de abate, com a terminação intensiva de 5 milhões de cabeças de bovinos até 2030, tem o potencial de mitigação de 16,25 Mt CO<sub>2</sub> eq, partindo de um valor médio de mitigação de 11,40 kg CO<sub>2</sub> eq kg<sup>-1</sup> por carcaça.

De fato, a expansão da adoção das tecnologias relacionadas ao processo de ILPF tem o potencial de intensificar a produção em terras cultivadas; promover a resiliência aos efeitos das mudanças climáticas sem aumentos proporcionais nos impactos ambientais (Peterson et al., 2020); reduzir as emissões associadas à produção agrícola; além de promover ganhos de produtividade para atender a demanda global de alimentos e conservação do meio ambiente (Garrett et al., 2017) e fornecer uma fonte de renda mais estável e diversificada ao longo do ano, com redução de riscos a todos

os tipos de choques aos agricultores (Bell et al., 2014). Por exemplo, segundo Silva et al. (2022), apenas a adoção do plantio direto no plantio da soja pode aumentar em 0,1 kg m<sup>-3</sup> (11%) a produtividade de água da cultura para grãos em Piracicaba, SP, e 8% em Teresina, PI, e, quando irrigada com mais de 60% da água disponível no solo, não resulta em aumento na produtividade, apesar do aumento na oferta de água. Assad et al. (2021) realizaram uma análise do potencial de mitigação de GEE pela recuperação de pastagens degradadas e adoção de ILPF até o ano de 2030. Considerando a trajetória recente da evolução das pastagens brasileiras, a área total de pastagem em 2030 seria 3,7% menor, contando com 164,3 Mha, com a liberação de 6,5 Mha para diferentes usos quando comparado à área adotada em 2018. Em paralelo, seriam recuperados 27,5 Mha de pastos degradados. Essa dinâmica de uso da terra poderia oferecer ganhos de produtividade ao rebanho bovino, que atingiria uma taxa de lotação de 1,27 cabeça por hectare, com a remoção líquida total de carbono de 1.223,6 Mt CO<sub>2</sub> eq, em média 94,1 Mt CO<sub>2</sub> eq por ano, invertendo, dessa forma, as emissões do sistema de pecuária associadas às pastagens.

De forma concordante com as proposições de Stabilea (2019), o Brasil tornou-se uma potência agrícola, mas, historicamente, o crescimento da produção agropecuária ocorreu às custas de seus ecossistemas nativos, com a substituição, desde 1985, de cerca de 65 Mha de florestas e savanas na Amazônia por pastagens e lavouras. Atualmente, a tendência de intensificação e integração produtiva, diminuindo a pressão sobre o desmatamento de novas áreas, a implementação do novo Código Florestal e as perspectivas de regulamentação de um mercado de pagamento por serviços ambientais constituem importantes vetores para a redução da pressão sobre o desmatamento de novas áreas, com reflexos diretos na redução das emissões relacionadas às mudanças de uso das terras, principal fonte das emissões do País (SEEG, 2022a).

Entretanto, como previsto nos Planos ABC e ABC+, a necessidade de comprovação das metas de redução das emissões assumidas pelo Brasil exigirá desenvolvimento e aplicação de um sistema robusto de monitoramento, relato e verificação (MRV) da redução das emissões. Manzatto et al. (2018) ressaltam que o MRV deve ainda corresponder às expectativas da sociedade quanto ao enfrentamento das mudanças globais, observando os riscos e as oportunidades que os mercados irão demandar. Riscos relacionados aos novos padrões e regulamentações de produção passíveis de exigências pelos mercados; e oportunidades pelo carbono sustentável na adoção das tecnologias que sequestram carbono no solo e na paisagem, proporcionando, ainda, redução de custos e/ou ganhos de produtividade na agropecuária tropical. Ou seja, não basta divulgarmos que buscamos a sustentabilidade; teremos que ter números para comprovar o cumprimento dos compromissos assumidos.

A Embrapa Meio Ambiente tem participado ativamente nas questões relacionadas às mudanças climáticas através de pesquisas e estudos em apoio ao Inventário

Nacional de GEE, Análise de Ciclo de Vida e Renovabio, bem como de parcerias com o setor privado para o desenvolvimento de estimativas de sequestro de C em cultivos anuais e na pecuária. Através da Plataforma ABC, a empresa pública vem desenvolvendo esforços, em conjunto com a Associação Rede ILPF, Embrapa Solos, Embrapa Agricultura Digital, Departamento de Solos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Lapig/UFG, Centro de Agronegócio da FGV (GV Agro), Minerva Foods, Cor-teva Agrosience e Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Sustentável (IABS), para o desenvolvimento de uma abordagem MRV focada nas propriedades rurais – Escopo I e II, por meio da adaptação e validação final de ferramentas gratuitas como o Sistema AgroTag MRV, calculadora GHG Protocol, SatVeg e Sistema de Caracterização Ambiental de Imóveis Rurais Rurais (SACIR), aplicativos especialmente ajustados para esta abordagem.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise conjunta dos dados apresentados sobre a dinâmica de uso das terras, agricultura, mudanças climáticas e agricultura de baixo carbono permitem concluir que a redução das emissões dentro da propriedade rural pela adoção das SPSABC, associadas à integração e intensificação produtiva, possibilitam diminuir a pressão para a abertura de novas áreas de vegetação nativa e atender as demandas de produção de alimentos, fibras e energia. Políticas públicas, como o Plano ABC+, aliadas a ações integradas entre agentes públicos e setor privado que estimulam a adoção de tecnologias e sistemas produtivos de baixo carbono, assistência técnica de qualidade e acesso a mercados para os agricultores, contribuem com a redução das emissões pelo uso e mudança das terras, especialmente se houver redução do desmatamento, o que pode restabelecer a liderança do País na gestão de recursos naturais, ampliando e consolidando mercados cada vez mais exigentes em relação à sustentabilidade e às mudanças climáticas.

Concluindo, o atual o cenário de mudanças climáticas, agravado pelas ações antrópicas, exige mudanças nos sistemas de produção agropecuária e uso das terras, com vistas ao desenvolvimento sustentável. Uma agenda “ganha-ganha”.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, E.; BARRETO, P.; BAIMA, S.; GOMES, M. **Unidades de Conservação mais desmatadas da Amazônia Legal (2012-2015)**. Belém: Imazon. 89 p. 2017.
- ASSAD, E. D.; ESTEVAM, C. G.; DE LIMA, C. Z.; PAVÃO, E. M.; PINTO, T. P. **Potencial de mitigação de gases de efeito estufa das ações de descarbonização da pecuária até 2030**. São Paulo: Observatório de Conhecimento e Inovação em Bioeconomia; FGV-EESP, 2021. Disponível em: [https://eesp.fgv.br/sites/eesp.fgv.br/files/ocbio\\_potencial\\_de\\_mitigacao\\_de\\_gee\\_pecuaria\\_2112.pdf](https://eesp.fgv.br/sites/eesp.fgv.br/files/ocbio_potencial_de_mitigacao_de_gee_pecuaria_2112.pdf). Acesso em: 23 mar. 2022.
- BELL, L. W.; MOORE, A. D.; KIRKEGAARD, J. A. Evolution in crop–livestock integration systems that improve farm productivity and environmental performance in Australia. *European Journal of Agronomy*, v. 57, p. 10-20, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.04.007>.
- BERNDT, A.; TOMKINS, N. W. Measurement and mitigation of methane emissions from beef cattle in tropical grazing systems: a perspective from Australia and Brazil. *Animal*, v. 7, p. 363-372, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S1751731113000670>.
- BRASIL. Decreto nº 9.703, de 17 de novembro de 1998. Dispõe sobre os depósitos judiciais e extrajudiciais de tributos e contribuições federais. **Diário Oficial da União**, 18 nov. 1998. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19703.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19703.htm). Acesso em: 24 abr. 2023.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono)**. Brasília, DF: MAPA, 2012. 172 p.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **AGROSTAT: Estatísticas de Comércio Exterior do Agronegócio Brasileiro**. Brasília, DF: MAPA, 2022. Disponível em: <https://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>. Acesso em: 24 abr. 2023. p. 22
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Plano ABC em números**. Brasília, DF: MAPA, 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/plano-abc-em-numeros>. Acesso em: 24 nov. 2023.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **4ª comunicação nacional do Brasil à convenção quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima: esforços do Brasil para a implementação da UNFCCC são coordenados pelo MCTI com a participação de 400 especialistas de cerca de 100 instituições nacionais**. Brasília, DF: Secretaria de Pesquisa e Formação Científica, 2021b. 620 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Delimitação das unidades de conservação de proteção integral no Brasil**: arquivo vetorial. Brasília, DF: MMA, 2013. Disponível em: <http://www.mma.gov.br>. Acesso em: 20 out 2022.
- CARDOSO, A. S.; BERNDT, A.; LEYTEN, A.; ALVES, B. J. R.; CARVALHO, I. das N. O de; SOARES, L. H. de; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use. *Agricultural Systems*, v. 143, p. 86-96, mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.12.007>.
- DIAS-FILHO, M. B. **Degradação de pastagens: processos, causas e estratégias de recuperação**. 4. ed. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2011. 215 p.

EMBRAPA. Centro de Inteligência e Mercado de Caprinos e Ovinos. **Produção nacional**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/cim-inteligencia-e-mercado-de-caprinos-e-ovinos/producao-nacional>. Acesso em: 28 sep.2022.

EMBRAPA. **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 212 p.

FERREIRA JÚNIOR, L. G. (coord.). **Dinâmica das pastagens brasileiras: ocupação de áreas e indícios de degradação: 2010 a 2018**. Chácaras Califórnia: LAPIG, out. 2020. 19 p. Disponível em: [https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/243/o/Relatorio\\_Mapai.pdf](https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/243/o/Relatorio_Mapai.pdf) Acesso em: 20 out 2022.

FUNAI. Terras indígenas do Brasil: dados vetoriais. Escala: 1:100.000. Brasília, DF, 2011. Disponível em: <https://www.gov.br/funai/pt-br/atuacao/terras-indigenas/geoprocessamento-e-mapas>. Acesso em: 15 abr. 2014.

GARRETT, R. D.; NILES, M. T.; GIL, D. B.; GAUDIN, A.; CHAPLIN-KRAMER, R.; ASSMANN, A.; ASSMANN, T. S.; BREWER, K.; CARVALHO, P. C. F.; CORTNER O.; DYNES, R.; GARBACH, K.; KEBREAB, E.; MUELLER, N.; PETERSON, C.; REIS, J. C.; SNOW, V.; VALENTIM, J. Social and ecological analysis of commercial integrated crop livestock systems: Current knowledge and remaining uncertainty. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 136– 146, jul. 2017.

HOUGHTON, J. T.; DING, Y.; GRIGGS, D. J.; NOGUER, M.; LINDEN, P. J. van der; DAI, X.; MASKELL, J.; JOHNSON, C. A. (ed.). **Climate change 2001: the scientific basis**. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 881 p.

IBGE. **Biomass do Brasil: 1:250000**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15842-biomass.html>. Acesso em: 01 nov. 2022f.

IBGE. **Monitoramento da cobertura e uso da terra do Brasil 2016 – 2018**. 26 p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101703.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2022d.

IBGE. **Pesquisa da pecuária municipal: tabela 3939: efetivo dos rebanhos, por tipo de rebanho**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/3939>. 2022a. Acesso em: 01 de nov. 2022.

IBGE. **Produção agrícola municipal de 1974 a 2021: tabela 1612: área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/1612>. 2022b. Acesso em: 01 de nov. 2022.

IBGE. **Produção agrícola municipal de 1974 a 2021: tabela 1613: área destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras permanentes**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/1613>. 2022c. Acesso em: 01 de nov. 2022.

IBGE. **Rebanho de bovinos (bois e vacas)**. 2022. Disponível em <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/bovinos/br>. Acesso em: 25 out 2022e.

KRETER, A. C.; PASTRE, R. Comércio exterior do agronegócio: balanço de 2021 e perspectivas para 2022: carta de conjuntura. **Carta de conjuntura**, n. 54, p. 1-17, 2022. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cartadeconjuntura/index.php/2022/01/comercio-exterior-do-agronegocio-balanco-de-2021-e-perspectivas-para-2022/>. Acesso em: 23 out. 2022.

LIMA, R. C. A.; HARFUCH, L.; PALAURO, G. R. **Plano ABC: evidências do período 2010-2020 e propostas para uma nova fase 2021-2030**. Agroicone, 2021. 144 p. Disponível em: <https://www.agroicone.com.br/wp-content/uploads/2020/10/Agroicone-Estudo-Plano-ABC-2020.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2023.

MACEDO, M. C. M. Pastagens no ecossistema cerrados: pesquisas para o desenvolvimento sustentável. In: SIMPOSICO SOBRE PASTAGENS NOS ECOSISTEMAS BRASILEIRO: PESQUISAS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTAVEL, 1995, Brasília. Anais... Brasília: SBZ, 1995. p. 28-62.

MAGALHAES, K. A.; HOLANDA FILHO, Z. F.; MARTINS, E. C.; LUCENA, C. C. de. Caprinos e ovinos no Brasil: análise da Produção da Pecuária Municipal 2019. *Boletim do Centro de Inteligência e Mercado de Caprinos e Ovinos*, n. 11, dez. 2020. 6 p.

MANZATTO, C. V.; ARAUJO, L. S. de; ASSAD, E. D.; SAMPAIO, F. G.; SOTTA, E. D.; VICENTE, L. E.; PEREIRA, S. E. M.; LOEBMANN, D. G. dos S. W.; VICENTE, A. K. **Mitigação das emissões de gases de efeito estufa pela adoção das tecnologias do Plano ABC: estimativas parciais.** Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2020. 35 p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 122).

MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; BACA, J. F. M.; ZARONI, M. J.; PEREIRA, S. E. M. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55 p. (Documentos. Embrapa Solos, 110).

MANZATTO, C. V.; SPINELLI-ARAUJO, L.; VICENTE, L. E.; VICENTE, A. K.; PEROSA, B. **Plataforma ABC: monitoramento da mitigação das emissões de carbono na agropecuária.** *Agroanalysis*, v. 38, n. 3, p. 26-29, 2018.

MAPBIOMAS Brasil. **Coleção 7.1 do MapBiomas inclui dados anuais de cobertura e uso da terra para o período de 1985 a 2021.** Disponível em: <http://plataforma.brasil.mapbiomas.org/>. Acesso em: 26 abr. 2023b.

MAPBIOMAS Brasil. **Downloads.** Disponível em: <https://mapbiomas.org/download>. Acesso em: 26 abr. 2023a.

MBOW, C.; ROSENZWEIG, C. (coord.) Food Security. In: SHUKLA, P. R.; CALVO-BUENDÍA, E.; MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D.; ZHAI, P.; SLADE, R.; CONNORS, S.; DIEMEN, R. van; FERRAT, M.; HAUGHEY, E.; LUZ, S.; NEOGL, S.; PATHAK, M.; PETZOLD, J.; PEREIRA, J. P.; VYAS, P.; HUNTLEY, E.; KISSICK, K.; BELKACEMI, M.; MALLEY, J. (ed.). **Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.** Genebra: IPCC, 2019. p. 437-550. Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/08\\_Chapter-5.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/08_Chapter-5.pdf). Acesso em 24 de jun. 2022. 2019.

METZ, B.; DAVIDSON, O.; CONINCK, H. de; LOOS, M.; MEYER, L. (ed.). **IPCC special report on carbon dioxide capture and storage.** Cambridge: Cambridge University Press, Cambridge. 2005. 444 p.

PETERSON C. A.; DEISS L.; GAUDIN A. C. M. Commercial integrated crop-livestock systems achieve comparable crop yields to specialized production systems: a meta-analysis. *PLoS One*, v. 15, n. 5, e0231840, May 7, 2020. DOI: <https://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0231840>.

PIB do agronegócio 2022: após alcançar patamar recorde em 2021, PIB do agronegócio recua 4,22% em 2022. Brasília, DF: CEPEA; CNA, 17 mar. 2023. 20 p. Disponível em:

SÁ, J. C. M.; LAL, R.; CERRI, C. C.; LORENZ, K.; HUNGRIA, M.; CARVALHO, P. C. de F. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. *Environment International*, v. 98, p. 102-112, 2017. DOI: [https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/PIB-DO-AGRONEGOCIO-2022.17MAR2023\(t\).pdf](https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/PIB-DO-AGRONEGOCIO-2022.17MAR2023(t).pdf)

SAMBUICHI, R. H. R.; OLIVEIRA, M. A. C.; SILVA, A. P. M.; LUEDEMANN, G. **A sustentabilidade ambiental da agropecuária brasileira: impactos, políticas públicas e desafios.** Brasília, DF: IPEA, 2012. 46 p. (Texto para discussão, 1782).

SEEG. **Desafios e oportunidades para redução das emissões de metano no Brasil.** [S.l.]: Ipam; IEMA; ICEI; Imaflora; OC; Revuo Design, out. 2022b. 82 p. Disponível em: [https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/Estudo\\_Metano/ObsClima\\_SEEG2022\\_FINAL.pdf](https://seeg-br.s3.amazonaws.com/Documentos%20Analiticos/Estudo_Metano/ObsClima_SEEG2022_FINAL.pdf). Acesso em: 18 out. 2022.

SEEG. **Emissões totais.** 2022a. Disponível em: [https://plataforma.seeg.eco.br/total\\_emission](https://plataforma.seeg.eco.br/total_emission). Acesso em: 23 out. 2022.

SILVA, E. H. F da; HOOGENBOOM, G.; BOOTE, K. J.; GONÇALVES, A. O.; MARIN, F. R. Predicting soybean evapotranspiration and crop water productivity for a tropical environment using the CSM-CROPGRO-Soybean model. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 323, 15 Aug. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109075>. Acesso em: 15 mai. 2020.

SOARES-FILHO, B. S. **Impacto da revisão do código florestal: como viabilizar o grande desafio adiante?** Brasília, DF: Secretaria de Assuntos Estratégicos, 2013. 27 p. Disponível em: [https://site-antigo.socioambiental.org/sites/blog.socioambiental.org/files/nsa/arquivos/artigo-codigo-florestal\\_britaldo\\_soares\\_sae\\_2013pdf.pdf](https://site-antigo.socioambiental.org/sites/blog.socioambiental.org/files/nsa/arquivos/artigo-codigo-florestal_britaldo_soares_sae_2013pdf.pdf). Acesso em: 03 out. 2022.

STABILEA, M. C. C.; GUIMARÃES, A. L.; SILVA, D. S.; RIBEIRO, V.; MACEDO, M. N.; COEA, M. T.; PINTO, E.; MOUTINHO, P.; ALENCAR, A. Solving Brazil's land use puzzle: increasing production and slowing Amazon deforestation. *Land Use Policy*, v. 91, 104362, Feb. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104362>.

TERRA Brasilis: PRODES (Desmatamento). INPE, 2011. Disponível em: <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/map/deforestation?hl=pt-br>. Acesso em 20 set. 2022.

TUBIELLO, F. N.; KARL, K.; FLAMMINI, A.; GÜTSCHOW, J. G.; OBLI-LARYE, G.; CONCHEDDA, G.; PAN, X.; QI, S. Y.; HEIDARSDÓTTIR, H. H.; WANNER, N.; QUADRELLI, R.; SOUZA, L. R.; BENOIT, P.; HAYEK, M.; SANDALOW, D.; MENCOS-COTRERA, E.; ROSENZWEIG, C.; MONCAYO, J. R.; CONFORTI, P.; TORERO, M. Pre- and post-production processes along supply chains increasingly dominate GHG emissions from agri-food systems globally and in most countries. *Earth System Science Data*, v. 14, n. 4, ESSD, 14, 1795–1809, 14 Apr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-14-1795-2022>.



PARTE V  
**POLÍTICAS PÚBLICAS**

*“Não herdamos a Terra de nossos  
antepassados, nós a pegamos  
emprestada de nossos filhos”  
Provérbio Nativo Americano*



# ATUAÇÃO DA EMBRAPA MEIO AMBIENTE EM POLÍTICAS PÚBLICAS

*Luciano Lourenço Nass, Sandro Eduardo Marschhausen Pereira, Maria de Cléofas Faggion Alencar, Anderson Soares Pereira e Ana Paula Contador Packer*

## INTRODUÇÃO

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), vinculada ao Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa), tem por missão “*viabilizar soluções de pesquisa, desenvolvimento e inovação para a sustentabilidade da agricultura, em benefício da sociedade brasileira*”. Como parte de sua atuação para cumprir tal missão, a Embrapa promove levantamentos de informações para a análise de suas contribuições institucionais às políticas públicas, em cumprimento ao seu estatuto social, sendo essa iniciativa contemplada na agenda da empresa desde 2014 (Embrapa, 2015). Assim, ela estimula e apresenta iniciativas que fomentam sua participação e contribuição em diferentes processos que movem a engrenagem de apoio às políticas públicas, que se inicia com a estruturação das entregas de projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) e vai até sua conexão com o Poder Legislativo.

Instituições de Ciência e Tecnologia como a Embrapa são geradoras de conhecimento e informação, formalizando um entendimento de que “*política pública é uma diretriz (orientação para decisão e ação) elaborada para enfrentar um problema público, que é aquele entendido como coletivamente relevante*” (Embrapa, 2017). A Embrapa atua de forma direta e indireta em todo o ciclo das políticas públicas relacionadas ao setor agropecuário, ao meio ambiente e à ciência, a partir de sua programação de PD&I e de sua inter-relação em praticamente todos os níveis em que ocorre alguma decisão política (municipal, estadual, regional, nacional e internacional). A prospecção das demandas trazidas pela sociedade e suas inclusões na agenda de prioridades de PD&I são subsídios para atualização, implementação e criação de novas políticas públicas (Guimarães, 2013).

No contexto global, as ações em políticas públicas para o desenvolvimento de uma agropecuária sustentável têm um vínculo forte com a contribuição para o alcance das metas da Agenda 2030, estabelecida em 2015 pela Organização das Nações Unidas (ONU). Ao analisar a geração de conhecimentos e ativos tecnológicos para a

sustentabilidade da agropecuária brasileira, a Embrapa vinculou sua atuação, direta ou indiretamente, a todos os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que podem ser encontrados em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>.

A Embrapa Meio Ambiente, uma das unidades temáticas da empresa, concentra suas atividades em pesquisa, desenvolvimento e inovação na interface entre a agricultura e o meio ambiente, conciliando as demandas dos sistemas produtivos com as necessidades de conservação dos recursos naturais e preservação ambiental, com foco na sustentabilidade, considerando suas dimensões ambientais, sociais e econômicas.

Como é perceptível a amplitude do tema meio ambiente, o planejamento estratégico atual da Embrapa Meio Ambiente permeia sua atuação em temas na fronteira do conhecimento, como genômica, metagenômica e nanotecnologia; em problemas de relevância atual e futura, como mudanças climáticas, degradação de recursos hídricos e problemas fitossanitários emergentes; e em temas propositivos que buscam dar respostas concretas para os desafios da sustentabilidade na agricultura, por exemplo, sistemas integrados de produção, boas práticas agrícolas e aquícolas, gestão agroambiental, agricultura de base ecológica, sistemas agroflorestais, agregação de valor a produtos da biodiversidade, modelos de restauração de áreas de proteção permanente, entre outros. Com vistas à organização eficiente de suas atividades de PD&I e a otimização da coordenação interna das equipes, foram delineados os eixos estratégicos de atuação: 1. Qualidade agroambiental e sistemas produtivos sustentáveis; 2. Avaliação de impactos e gestão ambiental da agricultura; 3. Bioprospecção e biotecnologia ambiental; e 4. Mudanças climáticas globais e agricultura. Com equipes qualificadas em uma ampla diversidade de temas, a Embrapa Meio Ambiente apresenta um enorme potencial para apoiar e contribuir com uma extensa gama de políticas públicas relacionadas às suas atividades de atuação.

A definição da agenda e de alternativas são dois elementos principais que compõem o processo de formulação das políticas públicas (Capella, 2018). A Embrapa Meio Ambiente atua nas duas frentes, tanto por demanda quanto por prospecção de oportunidades, auxiliando com conhecimento científico a definição de agendas ou contribuindo para a determinação de alternativas, por meio de desenvolvimento e/ou oferecimento de soluções tecnológicas.

Packer et al. (2021) ressaltam que, na Embrapa Meio Ambiente, o envolvimento de sua equipe técnica na construção de políticas públicas formaliza-se na atuação em rede de parceiras e se concretiza praticamente em três situações: nos projetos de pesquisa e desenvolvimento; no atendimento de demandas diretas do Poder Executivo ou Legislativo (uso da expertise acumulada); e na participação da equipe em grupos externos (comitês, comissões, conselhos, grupos de trabalho, entre outros).

## A EVOLUÇÃO DAS ATIVIDADES EM POLÍTICAS PÚBLICAS

O reconhecimento da importância das políticas públicas foi uma motivação fundamental para a Embrapa Meio Ambiente organizar sua atuação e identificar suas contribuições ao tema. Para tanto, foi essencial promover uma sensibilização da equipe interna, incluindo pesquisadores, analistas, equipes de apoio e gestores, quanto à relevância da Ciência para as políticas públicas.

Tal iniciativa teve início em 2014, quando a Embrapa Meio Ambiente empenhou-se em fortalecer a discussão sobre as contribuições de atividades de pesquisas para políticas públicas, criando o Grupo de Trabalho de Políticas Públicas (GT-PP), que buscou associar seus resultados às políticas públicas (Figura 28.1). Em 2015/2016, o grupo mapeou e estabeleceu o processo para registrar a participação da Unidade em ações de políticas públicas nacionais e internacionais. Em 2016, o GT-PP elaborou um modelo de relatório institucional para o registro formal de contribuições da Unidade em políticas públicas, as quais foram acompanhadas através de entrevistas com os responsáveis pelos resultados para a validação das informações.



**Figura 28.1.** Linha do tempo da atuação do Grupo de Trabalho de Políticas Públicas da Embrapa Meio Ambiente.

Notas: GT-PP – Grupo de Trabalho de Políticas Públicas. SEG – Sistema Embrapa de Gestão. IG/DPCT/Unicamp – Instituto de Geociências do Departamento de Política Científica e Tecnológica da Universidade de Campinas.

Para compreender melhor a importância da participação em políticas públicas e ampliar as contribuições dos empregados nesse assunto, foi organizada uma série de eventos com a presença de especialistas externos (2017/2018). Em 2019, o GT-PP realizou a revisão do fluxo de trabalho e a definição dos tipos de contribuição da Unidade.

A partir dessas definições foi realizada a sistematização dos dados, e, pelo volume de informações existentes, foi identificada a necessidade de desenvolver um sistema informatizado para o registro e monitoramento das ações em que a Embrapa Meio Ambiente atua (2020/2022). Na sequência das atividades, o GT-PP concentrou seus esforços no desenvolvimento de um sistema web de gestão de ações em políticas públicas, que foi disponibilizado para uso e consultas pela comunidade da Embrapa Meio Ambiente em 2023.

O sistema web não apenas resolveu a questão de registro e recuperação das ações, mas também proporcionou ao GT-PP uma ferramenta que assegura o respaldo das informações registradas. Além de aprimorar a transparência para todas as partes envolvidas, o sistema oferece rastreabilidade e facilita o input dos indicadores de ações relacionadas às políticas públicas da Embrapa Meio Ambiente. Dessa forma, os gestores podem acompanhar e monitorar de maneira eficaz o comprometimento da Unidade com essas iniciativas. Com esse sistema, a atualização dos dados cadastrados e o acompanhamento podem ser realizados em qualquer navegador web, dentro e fora do ambiente de rede da Empresa. Ao longo do tempo o GT-PP vem implementando e executando ações para viabilizar o mapeamento das contribuições da Embrapa Meio Ambiente em ações de políticas públicas. A gestão desse processo (Figura 28.2) tem por objetivo registrar, caracterizar, validar e monitorar as participações nas ações de contribuição às políticas públicas, em um processo sistêmico de atuação.

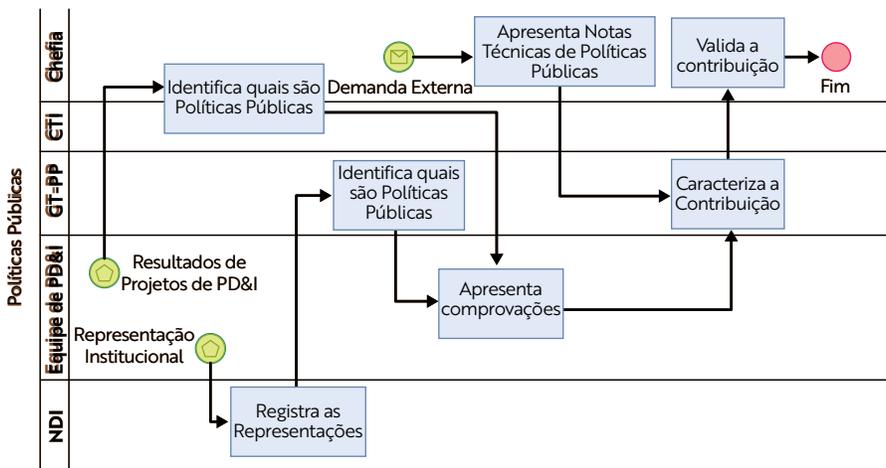
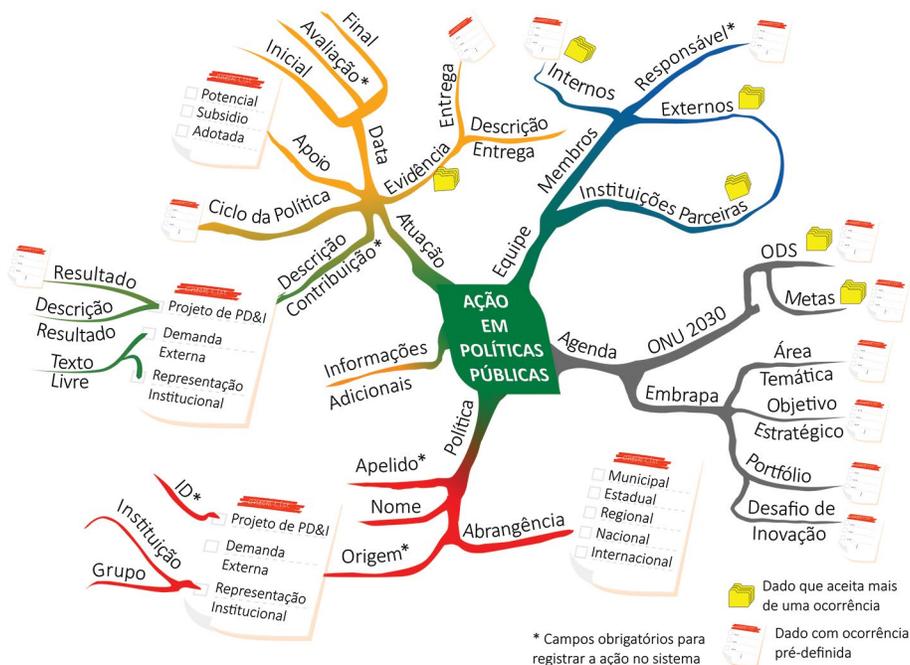


Figura 28.2. Fluxo do processo de gestão das contribuições da Embrapa Meio Ambiente para políticas públicas.

Fonte: Packer et al., 2021.

O GT-PP compreendeu que existem participações em diferentes tipos de políticas quanto à abrangência e, também, nos diversos ciclos e momentos de sua elaboração. Isso demonstra que a institucionalização do processo de gestão das contribuições às políticas públicas é uma maneira de garantir a evolução da Embrapa Meio Ambiente quanto ao cumprimento de sua missão que, alinhada a outras ações, garantirá maior eficiência, efetividade e eficácia às contribuições oferecidas aos gestores públicos.

No fluxo de gestão (Figura 28.2), após a entrada da demanda, as contribuições são identificadas, categorizadas e correlacionadas às políticas públicas. A alimentação dos registros de dados das contribuições às políticas públicas (Figura 28.3), bem como a busca pelas evidências de cada uma das contribuições, exige dos membros do GT-PP uma visão sistêmica de todos os acontecimentos e processos em andamento na Unidade. Isso provoca a transdisciplinaridade dos membros em suas respectivas áreas de atuação e os leva a pensar no processo constantemente (Packer et al., 2021).



**Figura 28.3.** Mindmap dos registros das contribuições da Embrapa Meio Ambiente. Fonte: Packer et al., 2021.

A seguir, descreve-se, de forma resumida, como são tratadas as políticas públicas na Embrapa Meio Ambiente. Informações detalhadas e uma discussão mais aprofundada sobre a evolução dos trabalhos com políticas públicas são apresentadas por Packer et al. (2021).

- **Origem das demandas:** são consideradas três origens para as contribuições em políticas públicas: a) projetos de PD&I; b) representações institucionais; e c) atendimentos a demandas externas.
- **Abrangência:** como os problemas e políticas públicas existem nas mais diversas esferas da ação governamental, são considerados diversos níveis de abrangência geográfica: internacional, nacional, regional, estadual e municipal.
- **Atuação:** com base na experiência acumulada, em 2019, as contribuições da Unidade passaram a ser classificadas como pontuais (apenas no ano corrente) ou continuadas (quando avançam para além do ano em estudo) e tratadas em três níveis: potenciais, subsídios ou adotadas, conforme a descrição apresentada na Figura 28.4.



Resultados de PD&I podem, num futuro próximo (2-3 anos), ser uma opção como contribuição às políticas públicas



Resultados de PD&I ou Notas Técnicas elaboradas pelo corpo técnico, utilizados para a melhoria dos processos decisórios e estruturação de políticas públicas.



Corpo técnico participa ativamente nos processos de elaboração, decisão e implementação das políticas públicas.

**Figura 28.4.** Classificação quanto à atuação da Embrapa Meio Ambiente em políticas públicas.

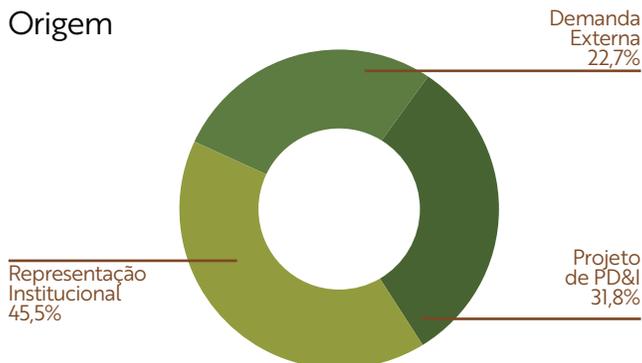
Fonte: Packer et al., 2021.

## RESULTADOS DE 2022

O GT-PP realiza a avaliação das contribuições da Embrapa Meio Ambiente anualmente. Isso possibilita vislumbrar sua atuação nas diversas esferas governamentais e internacionais.

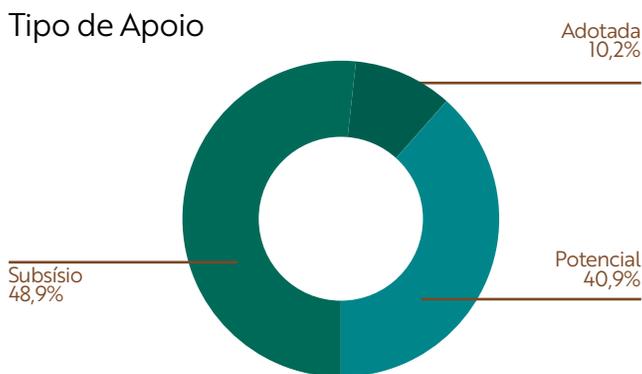
Após a sistematização das informações e a análise dos dados foi constatado que, em 2022, a Embrapa Meio Ambiente atuou em 50 políticas públicas. Há casos com mais de uma atuação na mesma política, totalizando 88 ações diretas, fato que evi-

dência a relevância do conhecimento gerado e o reconhecimento institucional junto aos tomadores de decisão. Nas ações identificadas em 2022, 40 foram oriundas de representações institucionais, 28 de resultados de PD&I e 20 de demandas externas (Figura 28.5).



**Figura 28.5.** Origem institucional da participação da Embrapa Meio Ambiente nas ações de políticas públicas, em 2022.

Apoios na forma de subsídio ou uma atuação direta na política adotada representaram a maioria das contribuições da Embrapa Meio Ambiente em 2022. Por outro lado, deve-se salientar que as contribuições caracterizadas como potencial (40,9%), geralmente baseadas em resultados de projetos de PD&I, estão disponíveis para apoiar ou nortear políticas existentes ou para estabelecer novas políticas (Figura 28.6).



**Figura 28.6.** Classificação do tipo de apoio da Embrapa Meio Ambiente às políticas públicas, em potencial, subsídio e adotada, em 2022.

A Figura 28.7 apresenta a abrangência político-territorial da Embrapa Meio Ambiente. Em função de seu mandato nacional é esperado que sua maior atuação seja com ações em políticas públicas nas esferas administrativas dentro do território brasileiro (72,7%). Por outro lado, embora em menor percentual, é importante mencionar que, durante o processo de geração e oferta de informação, conhecimento e tecnologias, a abrangência dos resultados gerados também pode influenciar o desenvolvimento de políticas municipais, estaduais, regionais e internacionais.

### Abrangência

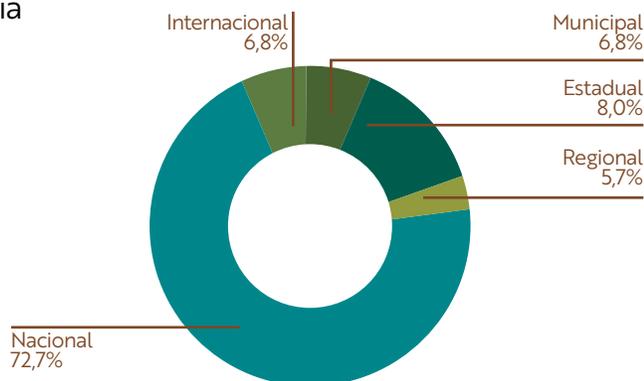
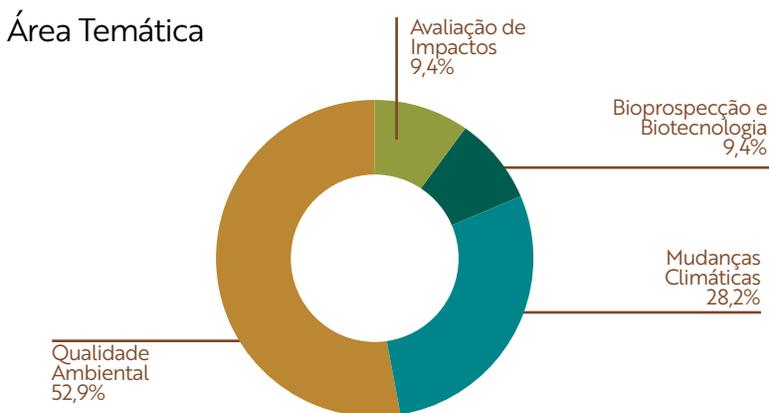


Figura 28.7. Abrangência político-territorial das ações de políticas públicas em que a Embrapa Meio Ambiente participou em 2022.

A Embrapa Meio Ambiente organizou suas atividades de PD&I em quatro grandes áreas: 1. Qualidade agroambiental e sistemas produtivos sustentáveis; 2. Avaliação de impactos e gestão ambiental da agricultura; 3. Bioprospecção e biotecnologia ambiental; e 4. Mudanças climáticas globais e agricultura. Em 2022, as ações em políticas públicas foram maiores nas áreas de qualidade agroambiental (52,9%) e mudanças climáticas (28,2%), conforme apresentado na Figura 28.8.

Com base no seu planejamento estratégico e nas suas áreas temáticas, é fato que a Embrapa Meio Ambiente está alinhada com o desenvolvimento de soluções de PD&I voltadas para a agricultura sustentável e a bioeconomia. Isso pode ser verificado pelas atividades desenvolvidas nos seguintes eixos: sistemas de produção sustentáveis; uso sustentável de recursos naturais; biotecnologia avançada e novos insumos biológicos para a agricultura; mudanças climáticas globais e implicações nos cenários agrícolas; sustentabilidade e avaliação de impactos sociais, ambientais e econômicos de atividades agrícolas; uso sustentável de resíduos agrícolas e urbano-industriais na agricultura; e comportamento de contaminantes e resíduos de agroquímicos no ambiente.



**Figura 28.8.** Distribuição das áreas temáticas estratégicas da Embrapa Meio Ambiente nas ações de políticas públicas, em 2022.

A Agenda 2030 foi estabelecida pela ONU em 2015, e os países signatários se comprometeram com a construção e implementação de uma política pública em busca do desenvolvimento sustentável. Na oportunidade, foram estabelecidos 17 ODS desdobrados em 169 metas, tendo em mente cinco perspectivas associadas e indivisíveis: pessoas, planeta, prosperidade, parceria e paz. Trata-se de uma agenda ampla que envolve todos os aspectos da sustentabilidade – ambiental, social e econômico.

É fato que a alimentação e a agricultura apresentam relação com praticamente todos os ODS. A Embrapa tem realizado um esforço no sentido de alinhar sua programação de pesquisa identificando formas de auxiliar o país no cumprimento desses objetivos e metas. Nesse sentido, a empresa desenvolve atividades que podem contribuir para 131 das 169 metas presentes nos 17 ODS.

A Embrapa Meio Ambiente participa ativamente desse esforço e contribui de maneira relevante para vários ODS. Em 2022, no caso específico das políticas públicas (Figura 28.9), as principais ações desenvolvidas contribuíram percentualmente, em ordem decrescente, para o ODS 2 – Fome zero e agricultura sustentável (31,0%); ODS 13 – Ação contra a mudança global do clima (27,6%); ODS 12 – Consumo e produção responsáveis (21,8%); ODS 17 – Parcerias e meios de implementação (10,3%); ODS 15 – Vida terrestre (5,7%); ODS 3 – Saúde e bem estar (1,1%); ODS 5 – Igualdade de gênero (1,1%); e ODS 6 – Água potável e saneamento (1,1%).



Figura 28.9. Atuação da Embrapa Meio Ambiente nas ações de políticas públicas associadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) em 2022.

## CONTRIBUIÇÕES DA EMBRAPA MEIO AMBIENTE

A sistematização das informações e o agrupamento dos dados permitem visualizar a identificação das ações, os tipos de apoio realizados, as abrangências e a quantidade de empregados envolvidos (Tabela 28.1). Em 2022, o GT-PP identificou 88 ações, das quais nove foram adotadas pelo poder público, 43 subsidiaram gestores públicos na elaboração das políticas públicas e 36 apresentaram um caráter potencial.

Essas ações estão associadas a aproximadamente 50 políticas públicas diferentes. Nesse sentido, há um constante esforço do GT-PP da Embrapa Meio Ambiente no acompanhamento das iniciativas relacionadas às políticas públicas, na análise das contribuições anuais, como também na divulgação das participações efetivas da instituição.

**Tabela 28.1.** Indicadores da participação da Embrapa Meio Ambiente em ações de apoio a políticas públicas acompanhadas no período de 2015 a 2022.

Ações de PP identificadas	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Ações de políticas públicas com origem em projetos de PD&I	5		18	13	10	23	33	28
Ações de políticas públicas com origem em representação institucional	15		33	40	32	47	41	40
Ações de políticas públicas com origem em demanda externa	-		-	2	10	9	26	20
<b>Ações de PP</b>								
Contribuições às políticas públicas validadas (PD&I, representações, demandas)	-		4	15	52	25	13	12
<b>Tipo de apoio (a partir de 2019)</b>								
Adotada					9	10	12	9
Subsídio					32	30	38	43
Potencial					11	39	50	36
<b>Abrangência (PD&amp;I, representações, demandas)</b>								
Internacional			7	10	6	12	10	6
Nacional			18	14	27	55	73	64
Regional			1	1	4	4	6	5
Estadual			2	3	9	4	6	7
Municipal			5	6	6	4	4	6
<b>Quantidade de empregados envolvidos (titular/suplente) nas representações institucionais</b>								
Empregados analistas/técnicos	-		4	6	13	16	17	25
Empregados pesquisadores	-		24	37	24	35	48	55
Envolvimento de empregados de grupo de PD&I (pesquisadores e analistas envolvidos × total de pesquisadores e analistas/ano)	-		23%	35%	31%	41%	52%	63%

Dentre as principais políticas públicas em que a Embrapa Meio Ambiente tem participado e contribuído com sua expertise, destacam-se:

- Abelhas sem ferrão;
- Agrotóxicos;
- Alimentos, ABNT;
- Aquicultura e pesca;
- Conselho Municipal de Desenvolvimento Rural de Campinas/SP;
- Código Florestal;
- Combate à desertificação;
- Combustível do futuro;
- Convenção de Estocolmo;
- Defesa agropecuária de São Paulo;
- Fertilizantes;
- Hub Internacional para o Desenvolvimento Sustentável (HIDS);
- HubTech da Agricultura Familiar;
- Lei Orgânica de Artur Nogueira/SP;
- Lei Paulista de Inovação;
- Licenciamento ambiental;
- Mudanças climáticas;
- Mulheres rurais do Brasil;
- Organismos geneticamente modificados (OGM);
- Paineis Sistemas Agroflorestais/SP;
- Política Estadual de Agroecologia e Produção Orgânica (Peapo);
- PI Brasil (Produção Integrada de Morango – PIMO);
- Plano ABC;
- Programa Nacional de Controle de Resíduos e Contaminantes em Produtos de Origem Vegetal (PNCRC);
- Políticas de meio ambiente – nacional e municipais;
- Política Nacional de Inovação;
- Política Nacional de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta;
- Política Estadual de Recursos Hídricos de São Paulo;
- Pragas quarentenárias;
- Programa Brasileiro de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV);
- Programa de Incentivo à Permanência no Campo (Proinp-Campo);
- Programa Nacional de Bioinsumos;
- Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil (Pro-naSolos);
- Pagamento por serviços ambientais (PSA);
- Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio);

- Sistema Nacional de Segurança Alimentar e Nutricional (Sisan);
- Solo agrícola;
- Tratado Internacional sobre Recursos Fitogenéticos para a Alimentação e a Agricultura (TIRFAA);
- Vigilância Sanitária;
- Vitivinicultura;
- Programa Nacional de Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A iniciativa do GT-PP da Embrapa Meio Ambiente com relação às políticas públicas foi pioneira e inovadora na Embrapa. Tal atuação tem incentivado e colaborado com a gestão da empresa para incorporar tais ações em âmbito corporativo.

As políticas públicas são fundamentais para o desenvolvimento da sociedade em geral, uma vez que promovem e direcionam recursos para áreas específicas. Vale ressaltar que existem contribuições que são de longo prazo, ou seja, são aportadas de forma contínua, havendo na Embrapa Meio Ambiente ações iniciadas há mais de 20 anos.

A partir da criação do GT-PP, a Embrapa Meio Ambiente passou a sistematizar a análise dos resultados relacionados a ações em políticas públicas. Assim, essa iniciativa promoveu o avanço nas interpretações e no estabelecimento de um fluxo que permite validar a atuação dos seus empregados. A necessidade de integrar informações para a análise de suas contribuições institucionais, possibilitou mensurar ações que permeiam as linhas de pesquisa, os portfólios de projetos e seus respectivos desafios de inovação, bem como os ODS.

As ações em políticas públicas ocorrem nas esferas municipal, estadual, regional, nacional e internacional. Com isso, os resultados do trabalho do GT-PP mostram que a Unidade tem vocação e capacidade para fomentar políticas públicas nas suas diferentes etapas de construção. Dessa forma, a Embrapa Meio Ambiente tem contribuído significativamente para o desenvolvimento de políticas voltadas para uma agropecuária sustentável.

## REFERÊNCIAS

CAPELLA, A. C. N. **Formulação de Políticas públicas**. Brasília: Enap, 2018. 151 p.

EMBRAPA. **Agenda de prioridades 2014-2030**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. 24 p.

EMBRAPA. Secretaria de Inteligência e Macroestratégia. **Nota técnica: contribuições da Embrapa para políticas públicas: conceitos e desafios**. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

GUIMARÃES, M. K. A. V. de O. **A gestão que não aparece: estudo etnográfico de um projeto de pesquisa em rede da Embrapa**. 2013. 162 f. Dissertação (Mestrado em Política Científica e Tecnológica) – Instituto de Geociências, Unicamp, Campinas.

PACKER, A. P. C.; NASS, L. L.; CRIPPA, M. E. N.; ALENCAR, M. C. F.; GUIMARÃES, M. K. A. V. de O.; OLIVEIRA, P.; PEREIRA, S. E. M. **Inovação da Embrapa Meio Ambiente em gestão de políticas públicas**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2021. PDF (25 p.). (Documentos / Embrapa Meio Ambiente, 1516-4691; 129).



ISBN: 978-6-516-054-9



9 786554 670548

CGPE: 18651