

MANEJO DO SOLO PARA A SUSTENTABILIDADE DE SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

Wanderlei Bieluczyk

Professor colaborador III no Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo. E-mail: wanderleibieluczyk@gmail.com.

João de Andrade Bonetti

Professor adjunto/colaborador na Universidade Estadual de Maringá. E-mail: agro.bonetti@gmail.com.

Luiz Gustavo de Oliveira Denardin

Pesquisador associado na Universidade Federal de Rondonópolis. E-mail: luizgdenardin@gmail.com.

Gabriela Castro Pires

Doutoranda em Agronomia, Universidade Federal do Paraná. E-mail: gabrielacpires@outlook.com.

Alberto Carlos de Campos Bernardi

Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste. E-mail: alberto.bernardi@embrapa.br.

José Ricardo Macedo Pezzopane

Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste. E-mail: jose.pezzopane@embrapa.br.

Paulo César de Faccio Carvalho

Professor titular da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. E-mail: paulocfc@ufrgs.br.

Edicarlos Damacena de Souza

Professor associado I da Universidade Federal de Rondonópolis. E-mail: edicarlos@ufr.edu.br.

para intensificar a produção por meio de atividades que estão na porção intermediária entre a agricultura orgânica e a intensiva/especializada (Bonaudo et al., 2014; Moraes et al., 2019), os quais devem ser planejados de forma que possibilitem interações sinérgicas entre o solo, as plantas e os animais (Lemaire et al., 2014). Recentemente, os SIPA têm sido apontados como essenciais para enfrentar a insegurança alimentar e energética (Sá et al., 2017; Bieluczyk et al., 2020) e adicionalmente, poupar áreas de vegetação nativa para o armazenamento do carbono e da biodiversidade (Garrett et al., 2018). Pesquisas em SIPA têm crescido exponencialmente no Brasil, sendo que estes estudos predominantemente demonstram que integrar, culturas agrícolas como pastagens e/ou árvores no espaço ou no tempo têm melhorado a eficiência de uso da terra e dos recursos naturais (Salton et al., 2014; Moraes et al., 2018).

Diante das inúmeras possibilidades nos arranjos espaço-temporais entre culturas agrícolas, pastagens e árvores, e devido às pesquisas relacionadas ao tema serem recentes, diversas nomenclaturas para tais possibilidades têm surgido. Neste capítulo discutiremos algumas razões pelas quais a inserção do componente animal é essencial para obter sucesso nesses sistemas de integração. O termo “Sistema Integrado de Produção Agropecuária” tem sido

1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA) são estratégias promissoras

adotado pela FAO (Carvalho et al., 2014). No Brasil, os sistemas integrados com a presença do animal são conhecidos como Integração Lavoura-Pecuária (ILP), Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e Integração Pecuária-Floresta (IPF) (Balbino et al., 2011). Ao longo do capítulo utilizaremos o termo SIPA por questão de padronização e por englobar todas as modalidades de integração com a presença obrigatória do componente animal.

A atividade pecuária, aliada à diversificação no cultivo de plantas (culturas anuais e pastagens), otimiza a ciclagem biogeoquímica, aprimorando o manejo de resíduos animais e vegetais e, construindo uma resiliência biológica no sistema (Garrett et al., 2020). A modalidade de SIPA mais estudada e implementada, tanto no clima subtropical quanto no tropical, é a composta pelo cultivo de culturas anuais, geralmente na safra, com pasto na sucessão e pastejo por bovinos de corte (Moraes et al., 2014). Um dos arranjos mais comuns no clima tropical brasileiro é a produção de soja na safra, milho safrinha consorciado com gramíneas forrageiras (*e.g.*, braquiária), e o pastejo por bovinos após a colheita da lavoura (Moraes et al., 2018). Entretanto, há muitas possibilidades para os arranjos espaço-temporais na integração entre a lavoura e a pecuária, ajustados de acordo com as condições edafoclimáticas regionais, como será abordado no item 1.3 deste capítulo.

Nas últimas décadas, novos arranjos em SIPA foram estudados e aprimorados, com a inserção de árvores na integração com pastagens e culturas anuais. Dentre os diversos benefícios, as árvores constituem um investimento para retorno econômico de médio a longo prazo, além de comporem uma das principais estratégias ambientais para a agricultura de baixo carbono (Sá et al., 2017; Bieluczyk et al., 2021). A inserção das árvores acrescenta maior diversidade de componentes produtivos, havendo pelo menos dois estratos vegetais e novas interações no tempo e no espaço (Balbino et al., 2011). Nestes arranjos, as árvores passam a ser os componentes dominantes da integração. Assim, o principal desafio é projetar as suas fileiras e a sua densidade de tal forma que se reduza a competição interespecies, e se incremente as funções complementares no sistema (Pezzopane et al., 2020b). Tais interações, acima e abaixo da superfície do solo, determinam se o sistema será bem-sucedido (Sarto et al., 2020a), uma vez que, dependendo do arranjo, podem ser positivas, neutras ou negativas (ONG, 1996). Desta forma, os SIPA com a presença do componente florestal são mais complexos e, por isso, deve haver um planejamento cuidadoso estabelecido para a idade das árvores, levando em consideração a partição de recursos, como radiação solar, água e nutrientes (Pezzopane et al., 2020a).

O solo é considerado como um componente vivo dos SIPA, além de ser um fator chave no manejo, pois é o único que captura as modificações ao longo do tempo e centraliza os processos, funcionando como uma memória do sistema (Moraes et al., 2018). Por meio de avaliações dos atributos dos solos, identifica-se as interações entre solo-planta-animal que resultam na harmonia ou competição no sistema. Um solo de qualidade que, com

equilíbrio nos atributos físicos, químicos e biológicos, sustenta a produtividade e conserva o ambiente em que está inserido, melhora também a saúde dos componentes produtivos (Karlen et al., 1997; Cherubin et al., 2016). As alterações na qualidade dos solos podem ser monitoradas por indicadores sensíveis ao manejo, que fornecem informações úteis sobre as funções edáficas (Karlen et al., 2003) e possibilitam a identificação de agrossistemas e práticas de manejo mais sustentáveis (Cherubin et al., 2017). Neste contexto, um dos principais indicadores desta sustentabilidade é a matéria orgânica, por se relacionar diretamente à maioria dos atributos do solo.

Os SIPA incluem em seu manejo, necessariamente, práticas conservacionistas como o sistema de plantio direto (SPD). O SPD é uma prática conservacionista consolidada que tem favorecido o aporte e o acúmulo de matéria orgânica do solo (Ramos et al., 2018), portanto, beneficia a qualidade do ambiente edáfico e incrementa o potencial produtivo do sistema. Ao incorporar as práticas do SPD, os SIPA podem ser considerados como um passo adiante em sustentabilidade, pois, aumentam o nível de intensificação e diversificação da produção, resultando em melhor eficiência do uso da terra e maior retorno econômico. Contudo, a inserção da pecuária e/ou das árvores traz novas abordagens e particularidades no manejo para que se construa um solo saudável e produtivo. Considerando tais aspectos, neste capítulo será abordado diversas especificações atuais sobre manejo do solo em SIPA, incluindo as principais práticas estratégicas para a construção da fertilidade do solo, bem como o manejo dos componentes produtivos e a adubação do sistema com foco na conservação do solo, em busca de maximizar o retorno em sustentabilidade econômica, social e ambiental.

2 . REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Particularidades no manejo do solo frente à intensificação da produção agropecuária

2.1.1 Amostragem de solo

O primeiro passo para implementar com sucesso um SIPA, com foco no manejo conservacionista, é realizar um acurado diagnóstico da qualidade química, física e biológica do solo. Portanto, é necessário entender se o solo está ou não saudável para o cultivo das plantas e, com isso, montar estratégias de correção dos fatores limitantes para a produção, construindo gradativamente a sua fertilidade e estrutura física. O conhecimento sobre alguns parâmetros como – acidez ativa (pH), acidez potencial (H+Al), acidez trocável (Al⁺³) e a disponibilidade de nutrientes – podem ajudar na identificação dos principais fatores químicos que limitam o desenvolvimento das culturas que irão compor o sistema de produção (Raij et al., 2001).

Ao analisar os atributos físicos do solo, como a textura (teor de argila, areia e silte), a densidade do solo e a resistência à penetração, descobre-se como o solo está estruturado e sua susceptibilidade à compactação, seja pelo tráfego de máquinas ou pelo pisoteio animal (Bonetti et al., 2017). A interpretação cuidadosa do conteúdo de matéria orgânica do solo, levando em consideração a sua textura e o clima local, pode-se inferir sobre a condição de conservação em que a área se encontra (Bieluczyk et al., 2020).

O manejo detalhado da fertilidade química, bem como dos aspectos físicos e biológicos do solo em SIPA, estão abordados nos capítulos 6, 7 e 9 deste livro, respectivamente. Entretanto, no presente capítulo serão reforçadas algumas informações de uma prática prévia indispensável à adoção de quaisquer arranjos em SIPA: a amostragem de solo.

O solo é um corpo tridimensional, portanto, possui variações laterais, longitudinais, e em profundidade, que devem ser levadas em consideração na hora da amostragem para representar a área e o ambiente edáfico em que as raízes das plantas se desenvolverão. No que se refere à reflexão sobre a verdadeira condição do solo no campo, os erros são muito maiores na hora da amostragem do que no processo analítico laboratorial (Carter e Gregorich, 2007). Decorrente disso, uma amostragem de solo não representativa induz a equívocos nas recomendações de manejo (*e.g.*, uso de corretivos e fertilizantes) (SBCS/ Nepar, 2019), portanto, reduz drasticamente a probabilidade de bons resultados no sistema.

Os procedimentos de amostragem para implementar os SIPA são bastante semelhantes aos da adoção do SPD, conforme as recomendações dos manuais e boletins técnicos para as diversas regiões do Brasil (*e.g.*, CQFS-RS/SC, 2016; SBCS/ Nepar, 2019; Freire et al., 2013; Bernardi et al., 2003), porém, com algumas particularidades. As forrageiras utilizadas para pastagens nos SIPA, especialmente as braquiárias, desenvolvem o seu sistema radicular em camadas profundas, podendo influenciar na dinâmica de nutrientes para além de 1,0 m de profundidade do solo (Fisher et al., 1994; Baptistella et al., 2020). Neste sentido, antes de implantar o SIPA é interessante que se conheça o perfil do solo profundamente, pois é necessário maximizar o desenvolvimento de raízes. Sugere-se coletar solo ao menos nas profundidades de 0-20 e 20-40cm para a caracterização inicial, principalmente se for amostrar um solo de pastagem que se encontra em algum grau de degradação (Serra et al., 2019). Por outro lado, quando o objetivo é o plantio de árvores, pode-se opcionalmente incluir a camada de 40-60cm como forma de caracterização da área. Amostragens profundas (20-40 cm e 40-60 cm) possibilitam verificar a necessidade de correção para eliminação de barreiras físicas (*e.g.*, compactação) ou químicas (*e.g.*, toxidez de alumínio e deficiência de cálcio) ao desenvolvimento radicular (Borges e Accioly, 2007).

No SIPA já implantado é recomendado que o solo seja amostrado nas camadas de 0-10cm, 10-20 cm e 20-40 cm a cada dois ou no máximo três anos, com o objetivo de acompanhar o processo da construção da fertilidade e da evolução em qualidade do

ambiente edáfico. O diagnóstico das condições de solo, ao longo do tempo, serve para suportar importantes tomadas de decisão nos ajustes de práticas para aperfeiçoamento do sistema. Pesquisas recentes, como será abordado nos itens 1.5 e 2.2, têm mostrado a essencialidade de se incluir análises biológicas do solo, considerando que os organismos são a principal engrenagem no funcionamento dos ciclos biogeoquímicos no solo (Cardoso e Andreote, 2016). Por isso, no sentido de aperfeiçoar o diagnóstico dos processos que se estabelecem no solo, em SIPA já implantado, recomenda-se destinar parte da amostra da camada de 0-10 cm para quantificação das enzimas β -glicosidase e arilsulfatase (bioanálise) (Capítulo 7).

Na amostragem pós-implementação do SIPA há novos cuidados relacionados às variações causadas pelo pisoteio e excretas dos animais (Araújo-Júnior e Bonetti, 2018), bem como pelo efeito das árvores, que condicionam o desenvolvimento das plantas do sub-bosque (Pezzopane et al., 2021) e o comportamento animal (Giro et al., 2019), resultando também em variações no solo ao longo da entrelinha dos renques (*e.g.*, Oliveira et al., 2018; Sarto et al., 2020a, b; Glatzle et al., 2021). Desta maneira, não se deve amostrar locais próximos às cercas (Figura 1A) e aos cochos (Figura 1B), bem como evitar coincidir com placas de esterco recentemente depositadas sobre o solo. Em sistemas com árvores a amostragem deve ser planejada e não aleatória, para representar efetivamente o espaço na entrelinha, onde são realizadas atividades de agricultura e/ou pecuária. Não há um padrão até então estabelecido para obter amostras de solo no espaço da entrelinha. Entretanto, propomos aqui que os produtores rurais colem metade das amostras simples (subamostras) na projeção da copa das árvores e metade próxima ao centro da entrelinha, como ilustrado na Figura 2A. De forma mais detalhada, para estudos de pesquisa, é recomendado que seja feito um intersecto na entrelinha das árvores, quantificando separadamente os atributos em ao menos quatro distâncias das árvores (Figura 2B). Esse número mínimo de posições permite traçar regressões e interpolações para melhor explorar a variabilidade espacial, conforme tem sido observado em vários trabalhos científicos (*e.g.*, Moreira et al., 2018; Oliveira et al., 2018; Glatzle et al., 2021).

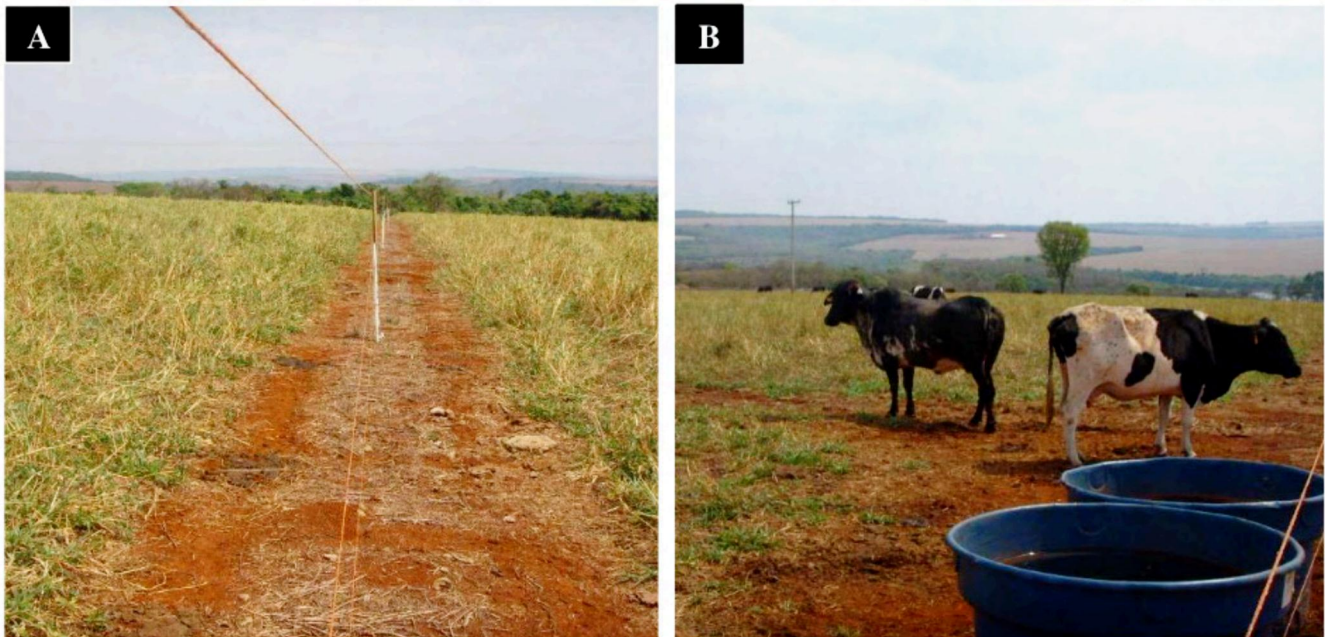


Figura 1. Concentração do pisoteio e dos resíduos de animais próximos às cercas (A) e aos cochos de acesso à água (B), modificando pontualmente o solo em sistema integrado de produção agropecuária. Fotos: João de Andrade Bonetti.

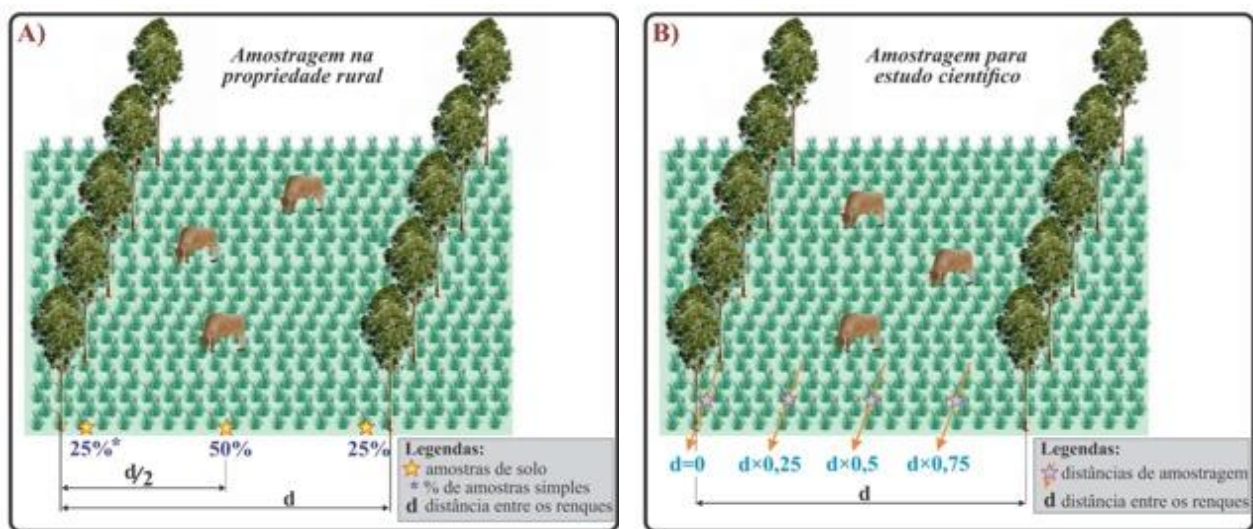


Figura 2. Recomendações de espacialização na obtenção de amostras de solo ao longo das entrelinhas das árvores em uma propriedade rural (A) e seccionamento em distâncias dos renques para estudos científicos detalhados (B). Fonte: Elaborado pelos autores.

2.1.2 Práticas conservacionistas de manejo

O uso de práticas conservacionistas de manejo, com base no diagnóstico frequente da qualidade do solo (atributos físicos, químicos e biológicos), é imprescindível em qualquer arranjo em SIPA. Um sistema integrado só obterá sucesso se adotar as premissas estratégicas de conservação do solo, sendo o uso do SPD uma delas. O SPD tem como princípios a manutenção permanente da cobertura vegetal, a rotação de culturas e o

revolvimento mínimo do solo. A cobertura permanente do solo funciona, principalmente, como uma barreira física ao impacto direto das gotas de chuva, reduzindo perdas de solo por carreamento de partículas em enxurradas (Montgomery, 2007). O não revolvimento do solo permite que o sistema radicular das espécies, em conjunto com a atividade biológica (Cardoso e Andreote, 2016), continuamente estruture o solo e forme agregados estáveis, mantenha a continuidade de poros e, conseqüentemente, aumente a infiltração e retenção de água no perfil (Salton et al., 2014). As espécies de plantas com distintos sistemas radiculares na rotação, consórcio ou sucessão, ativam a biota e exploram melhor o perfil do solo, tornando o uso e a ciclagem de água e nutrientes mais eficientes (Cardoso e Andreote 2016). Devido a tais benefícios, o SPD é uma prática estabelecida na agricultura brasileira e global, que, em sua consolidação no tempo, resulta em um sistema mais resiliente às alterações antrópicas e climáticas (Sá et al., 2014).

Importante destacar que as práticas conservacionistas complementares, como o cultivo em nível e o uso de terraços, devem ser consideradas para cada região e suscetibilidade do terreno, tornando-se fundamentais para a contenção da erosão à medida que a declividade aumenta (Serra et al., 2019). Chuvas de alta intensidade, comuns no Brasil, podem ultrapassar a capacidade de infiltração de água do solo e resultar em escoamento superficial. A energia cinética desta enxurrada aumenta, proporcionalmente, com a declividade do terreno e sua tensão cisalhante se torna maior do que a tensão crítica de cisalhamento dos resíduos culturais, o que pode resultar no desenvolvimento de sulcos e voçorocas, mesmo com SPD (Cassol et al., 2007). No SIPA, o cuidado para evitar os impactos da enxurrada deve ser dobrado, nunca utilizar intensidade alta de pastejo, que reduz a cobertura sobre o solo, favorece a sua compactação superficial e potencializa processos erosivos no sistema (Bonetti et al., 2019). Na presença de renques de árvores, estas devem estar dispostas paralelamente aos terraços e às árvores plantadas na sua jusante, disposição esta que comprovadamente tem minimizado os potenciais danos do pisoteio animal no sistema (Balbino et al., 2012; Serra et al., 2019).

O SIPA incorpora e adapta o conhecimento sobre as práticas conservacionistas do SPD. Entretanto, um SIPA tem potencial de transcender o SPD em conservação, se beneficiando da intensificação e da complementaridade nas interações entre solo, plantas e animais (Lemaire et al., 2014). Estes efeitos sinérgicos possibilitam uma nova auto-organização no sistema, que tem resultado em um maior fluxo de energia direcionado ao solo (*e.g.* estocagem de carbono no solo), favorecendo o aparecimento de diversas propriedades emergentes (*e.g.* novas funções desempenhadas por organismos no ambiente edáfico) (Salton et al., 2014). Nesta nova perspectiva, os componentes do sistema passam a ser os protagonistas biológicos ativos do manejo, e não apenas um alvo para a produtividade.

Adentrando na concepção do parágrafo acima, por exemplo, o pastejo pelos

animais e a constante renovação radicular de espécies vegetais passam a ser estratégias indispensáveis de manejo. A ação desses organismos potencializa os processos de ciclagem de nutrientes, dinamiza as reações biogeoquímicas e assim acelera o aporte e acúmulo de matéria orgânica no solo (Souza et al., 2018). Desta forma, ao longo do tempo, as diversas sinergias entre os componentes vivos ampliam as funções ecológicas no solo e melhoram a sua qualidade (Bieluczyk et al., 2020). Portanto, a inclusão do componente animal tem potencial de, principalmente sob intensidade de pastejo moderada (detalhes nos itens 1.3 e 1.6), amplificar o espectro conservacionista de manejo, onde o solo passa a potencializar as suas funções (detalhes no item 1.5) e a prestar valiosos serviços ecossistêmicos (detalhes no item 3.2).

2.1.3 Intercalando a lavoura e a pecuária

As estratégias de manejo em SIPA são caracterizadas pela inserção de componentes adaptados às condições climáticas de diferentes regiões produtoras de grãos e pecuária. Dessa forma, é possível inserir, no espaço e/ou no tempo, culturas de grãos, forrageiras e animais, melhorar a qualidade do solo, principalmente, por diversificar a produção, aumentar a ciclagem dos nutrientes e aportar maior quantidade e qualidade de resíduos.

No Brasil, o SIPA é uma alternativa de diversificação em áreas com sucessão de cultivos em SPD ou em áreas de pastagem, ambas com baixa diversificação (Latawiec et al., 2019). Na adoção do SIPA, em áreas de SPD, tem-se dado preferência para a manutenção de culturas de grãos na primavera/verão (soja, milho e arroz) e cultivo de forrageiras no outono/inverno, como aveia preta (*Avena strigosa*), azevém (*Lolium multiflorum L.*) e a braquiária (*Urochloa*), pastejadas por bovinos ou ovinos. Já no uso de SIPA em área de pastagens degradadas, diversos modelos têm sido bem-sucedidos na recuperação do solo e das pastagens. Para otimizar o custo da reforma dos pastos, o cultivo de grãos por dois ou mais anos, intercalado com pastagens no tempo, tem apresentado uma boa viabilidade econômica (Alvarenga et al., 2007). Independentemente do objetivo da implantação do SIPA, alguns aspectos podem ser considerados, como: i) disponibilidade e logística de escoamento dos produtos; ii) cotação agrícola; iii) as variações de temperatura e precipitação; e iv) agroambientais, relacionados à preservação dos recursos de solo e água.

Nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Norte existem extensas áreas com pastagens e sucessões de soja e milho ou soja e algodão. Os cultivos de grãos na primeira safra ocorrem de outubro a fevereiro. As pastagens, geralmente de braquiária devido ao seu rápido crescimento e ao volume de biomassa produzida (Baptistella et al., 2020), são conduzidas de março a setembro. Entretanto, há uma diversidade de culturas que podem ser inseridas no SIPA, como sorgo (*Sorghum bicolor*), milheto (*Pennisetum spp.*),

crotalária (*Crotalaria* spp.), é recentemente têm sido inseridos os consórcios de plantas de diferentes espécies/famílias. Na região Sul do Brasil, o SIPA tem adaptabilidade em áreas de soja, milho ou arroz (nas várzeas) na safra principal de outubro a março, e sucessão com pastagens de aveia preta ou de azevém na de abril a setembro (Martins et al., 2015; Carmona et al., 2018). No Nordeste, existe a possibilidade de integrar áreas de produção de frutas como a uva (*Vitis*) e manga (*Mangifera indica*) com forrageiras e pastejo sazonal de ovinos. Informações com base científica sobre esses sistemas ainda são necessárias. Nestes cenários, é possível manter ou implantar a cultura de grãos na primavera/verão e inserir a pastagem, possibilitando desde períodos curtos (dias) até mais longos (meses) de pastejo de bovinos de corte, leite ou ovinos.

Alguns aspectos devem ser observados na inserção dos componentes da pecuária, como: i) período adequado da semeadura das forrageiras; ii) momento correto da inserção dos animais para pastejo; e iii) oferta de forragem e manejo adequado da intensidade de pastejo. A intensidade de pastejo consiste em uma determinada carga de lotação animal por área. A altura do pasto, por estar relacionada à massa de forragem, pode ser um parâmetro utilizado para ajuste da carga animal por hectare ($UA\ ha^{-1}$) (Kunrath et al., 2020). O ajuste de carga animal irá variar de acordo com as características morfofisiológicas de cada forrageira. Portanto, a altura média ideal de manejo do pasto é específica para cada espécie forrageira, objetivando altas taxas de acúmulo pelo adequado desempenho fotossintético e uma boa renovação do pasto (Carvalho et al., 2010).

As principais forrageiras cultivadas no Brasil permitem a entrada de animais com acúmulo médio de $1,5\ Mg\ ha^{-1}$ (aveia + azevém) e $4,0\ Mg\ ha^{-1}$ (braquiária) de matéria seca (Bonetti et al., 2015; Martins et al., 2015). Essa dinâmica é diferenciada no consórcio de milho e braquiária, devido à menor produção de biomassa da braquiária, que irá interferir na taxa de lotação animal em pastejo (Oliveira et al., 2019). Dessa forma, é fundamental o conhecimento da oferta de forragem para o adequado controle da intensidade de pastejo. Estudos indicam que a biomassa residual anual não deve ser inferior a $6,0\ Mg\ ha^{-1}$ de fitomassa (idealmente de $8,0$ a $12,0\ Mg\ ha^{-1}$) (Salton et al., 1998; Cruz et al., 2005; Denardin et al., 2009). Portanto, para atender a demanda de contribuição de biomassa sobre o solo na fase pastagem, a altura do pasto para aveia e azevém está entre 20 e 30cm e para a braquiária entre 24 e 40cm, consideradas como intensidades de pastejo moderado (Bonetti et al., 2015; Kunrath et al., 2020).

Para evitar, ou ao menos atenuar, o escoamento superficial e os efeitos erosivos da chuva de alta intensidade, a manutenção da cobertura do solo e a conservação ou melhoria da estrutura do solo são essenciais. A intensidade de pastejo utilizada deve manter resíduos suficientes sobre o solo, maximizar o desenvolvimento radicular da pastagem e posteriormente, favorecer o rápido crescimento inicial das plantas. Com o rápido crescimento das plantas o solo estará mais protegido, aumentando sua capacidade

de regeneração (resiliência) quanto a compactação superficial (até 10 cm de profundidade) e permitindo o adequado crescimento das plantas.

Os efeitos positivos, ou complementares, em qualidade do solo proporcionados pelo SIPA são restritos pela transição de lavoura para pecuária e da pecuária para lavoura. Neste sentido, uma transição eficiente conserva o solo e maximiza o potencial produtivo das culturas e dos animais em pastejo. No planejamento de uma adequada transição os ciclos do sistema devem ser ajustados às condições climáticas da região, como a disponibilidade hídrica e térmica para o cultivo de grãos e forrageiras. Ao intercalar a pecuária com a lavoura, a fase mais crítica está na semeadura e desenvolvimento inicial da cultura de grãos, quando o solo pode ficar desprotegido em função da alta intensidade de pastejo e baixa biomassa residual (Figura 3). Decorrente disso, ocorre um lento desenvolvimento inicial da lavoura e exposição do solo aos processos de desagregação, causados por elevados volumes de chuva, frequentes em climas tropicais e subtropicais. No Sul do Brasil, em área sob SIPA, uma precipitação acumulada de 290,4 mm (Figura 4) em apenas três dias coincidiu com um período de retirada dos animais para o plantio da soja (Bonetti et al., 2019). Os autores classificaram este período como muito crítico para a conservação do solo, considerando que destes 290,4 mm, 112 mm precipitaram em duração de apenas duas horas. Chuvas acima de 25 mm h⁻¹ são classificadas como chuvas potencialmente erosivas (Hudson, 1995), e neste caso a pluviosidade foi dobro da crítica (56 mm h⁻¹). Chuvas torrenciais atípicas têm ocorrido de forma mais frequente nos últimos anos, e sob insuficiente proteção com biomassa residual os efeitos de erosão podem se agravar, causando sérios danos à conservação do solo.

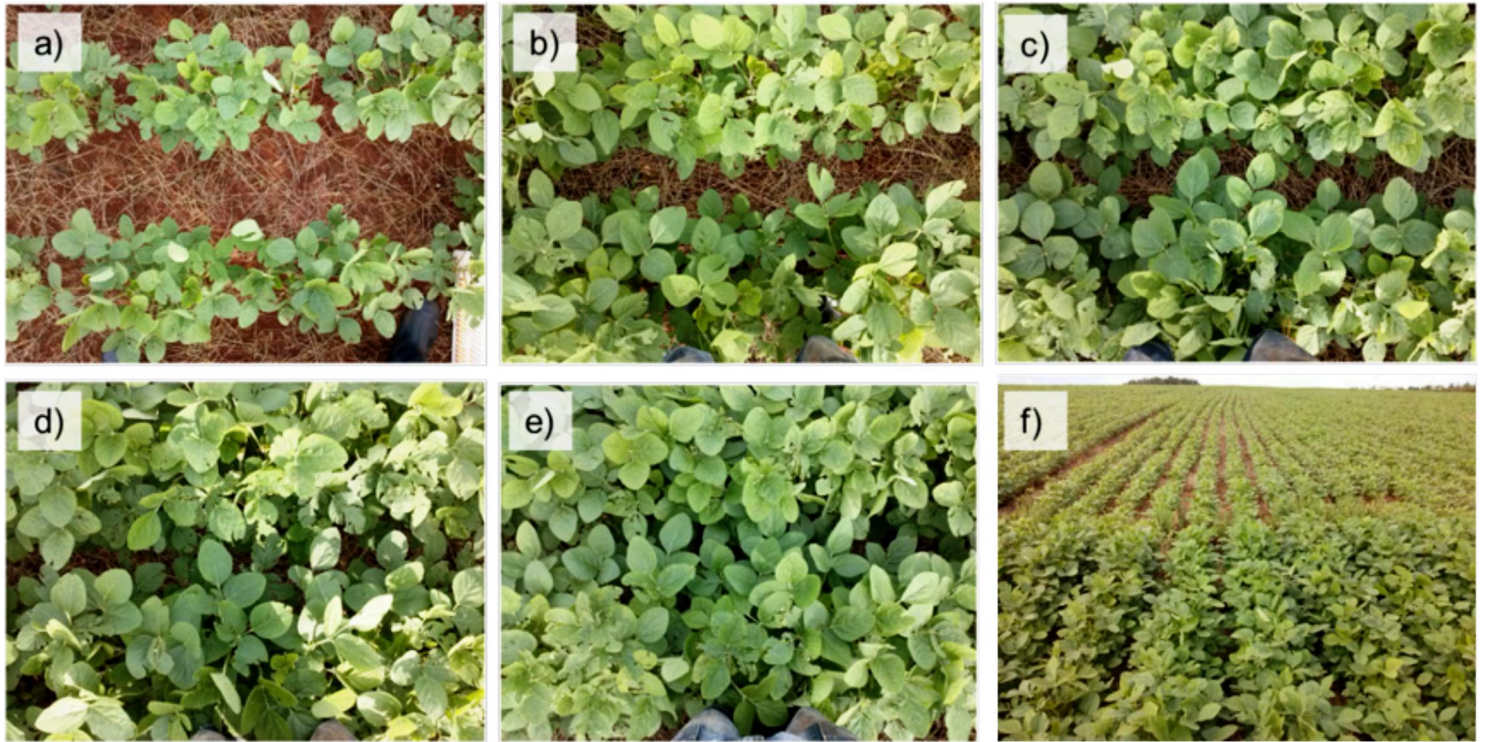


Figura 3. Desenvolvimento de soja aos 49 dias após a semeadura em área de sistema integrado de produção agropecuária com pastejo de bovinos em diferentes intensidades no Sul do Brasil. **a)** 10 cm de altura do pasto, densidade do solo (D_s) de $1,44 \text{ Mg m}^{-3}$, massa seca residual (M_{sr}) 480 kg ha^{-1} ; **b)** 20 cm de altura do pasto, D_s de $1,38 \text{ Mg m}^{-3}$, M_{sr} 2140 kg ha^{-1} ; **c)** 30 cm de altura do pasto, D_s de $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$, M_{sr} 3600 kg ha^{-1} ; **d)** 40 cm de altura do pasto, D_s de $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$, M_{sr} 4360 kg ha^{-1} ; **e)** Sem pastejo, D_s de $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$, M_{sr} de 5810 kg ha^{-1} ; e **f)** Visão geral das diferenças. Semeadura da soja em 28/11/2014 e fotos em 15/01/2015, após 14 anos de SIPA -PD. Fonte: Bonetti, 2017.

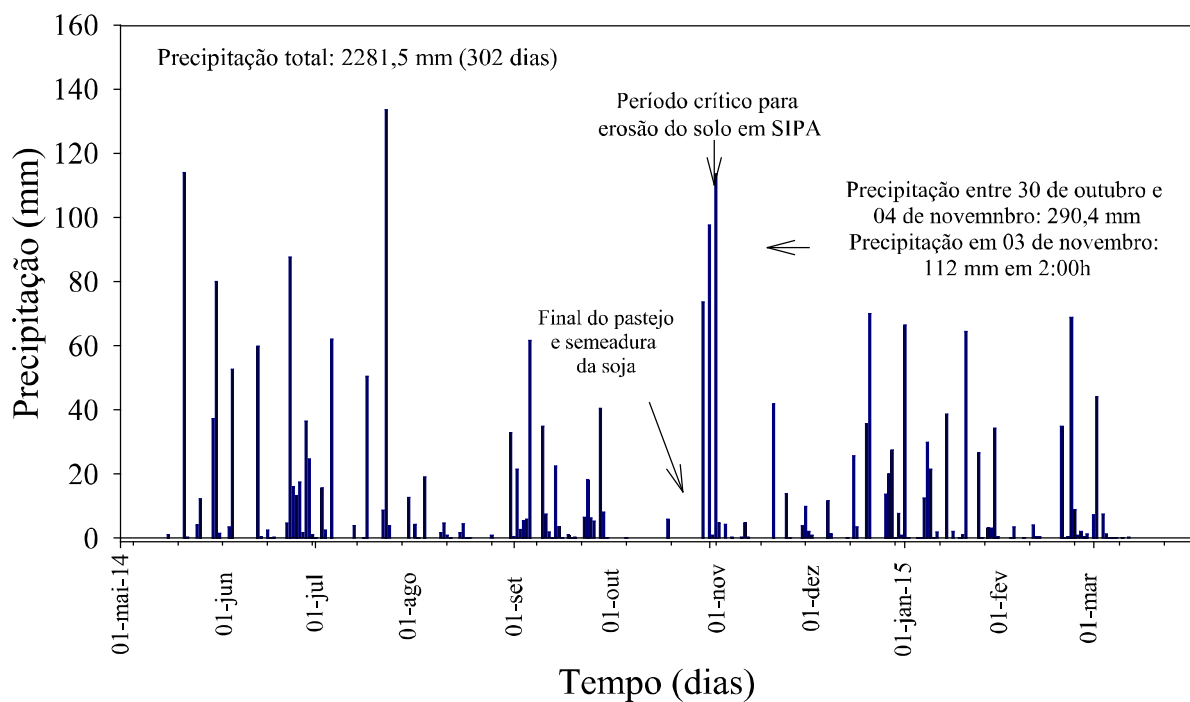


Figura 4. Precipitação pluviométrica em uma área experimental em sistemas integrados de produção agropecuária durante o cultivo de soja e ciclo de pastejo em São Miguel das Missões, Rio Grande do Sul.

2.1.4 A inserção da árvore no sistema de integração

A inserção de árvores em SIPA proporciona inúmeros benefícios ao longo do tempo, que culminam em uma melhoria na eficiência do uso da terra (Macedo, 2009). Nesses sistemas, além dos benefícios relacionados aos serviços ambientais (Sá et al., 2017) e ao conforto térmico animal (Pezzopane et al., 2019a), existe a possibilidade de diversificação e aumento de renda na atividade. A negociação de produtos madeireiros ou outros produtos provenientes das árvores, por exemplo a exploração frutífera, diversifica as receitas, reduz os riscos de mercado e garante maior segurança econômica para os produtores rurais.

Nos aspectos relacionados ao solo, os arranjos de SIPA, com árvores adequadamente manejados, estão associados com a conservação e melhoria de seus atributos físicos, químicos e biológicos. A literatura apresenta diversos serviços ecossistêmicos provenientes da inserção da árvore no SIPA. Se destacam: (i) o controle da erosão, por meio da maior retenção de água e redução do escoamento superficial (Castro Dias et al., 2020); e, (ii) a melhoria da fertilidade do solo, a partir da maior ciclagem de nutrientes, beneficiada pelo aporte de matéria orgânica com diversa relação C/N. Neste contexto, a integração com árvores amplia o aporte de matéria orgânica via liteira, bem como pelas raízes e seus exsudatos, aumenta a atividade microbiana no solo e aumenta a ciclagem dos nutrientes (Carvalho et al., 2019).

O aumento dos teores de C no solo (Bernardi et al., 2020) e C fixado nas árvores (Pezzopane et al., 2021), em arranjos de SIPA com árvores, mitigam as emissões de Gases de Efeitos Estufa (GEE) gerados pela atividade pecuária. Estudos têm demonstrado que esses sistemas integrados têm a capacidade de neutralizar a emissão de metano entérico pelos animais somada a de óxido nitroso e CO₂ pelo solo, ou mesmo tornar o balanço de carbono positivo no agroecossistema (Oliveira et al., 2020). Sistemas com 250 a 350 árvores de eucalipto ha⁻¹, planejados para corte das árvores aos oito a doze anos de idade, são capazes de produzir 25 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ de madeira (Ofugi et al., 2008; Pezzopane et al., 2021), o que corresponde a um sequestro anual de cerca de 5 Mg ha⁻¹ de C ou 18 Mg ha⁻¹ de CO₂ equivalente - somente pelos troncos – neutralizando a emissão de GEE de cerca de 12 bovinos adultos (Almeida et al., 2011).

Para a tomada de decisão sobre o arranjo e número de árvores no sistema de produção, fatores como a conservação do solo e da água e o destino da madeira produzida pelas árvores, devem ser levados em consideração no planejamento (Silva et al., 2010). Com relação à conservação do solo e da água, assim como em qualquer sistema de produção agropecuária, esse fator deve ser priorizado. Sendo assim, as linhas ou renques de árvores deverão ser conduzidas em nível, de forma a minorar a erosão do solo e a perda de água pelo escoamento superficial.

A inserção das árvores nos SIPA normalmente pode ocorrer em três momentos

ou condições: (i) em pastagem já implantada; (ii) em plantio simultâneo das árvores e da pastagem; e, (iii) em plantio das árvores com exploração de culturas agrícolas até o segundo-terceiro ano de implantação, com posterior plantio da pastagem. Nos dois primeiros casos, a entrada de animais nas áreas nos primeiros anos é condicionada ao uso de cerca protetora às árvores. Entretanto, os arranjos com árvores nos SIPA contemplam inúmeras possibilidades, não havendo um padrão de recomendação fixo a ser seguido. Todo o sistema, com a inserção da árvore na integração, deve ser planejado considerando as condições edafoclimáticas, a situação socioeconômica da propriedade e o mercado local, portanto, ter acompanhamento de um profissional da área habilitado.

Diversas espécies arbóreas nativas e exóticas têm sido indicadas para uso no SIPA como detalhado por Melloto et al. (2012). O planejamento do arranjo adequado depende das condições edafoclimáticas. A Tabela 1 traz um esquema ilustrativo de uma das inúmeras possibilidades desses arranjos. Neste caso, a tabela ilustra um planejamento conceitual para um SIPA com eucalipto, soja, milho, braquiária e pastoreio de bovinos de corte na região do Cerrado. Arranjos diversos também surtem efeitos diversos nos atributos do solo, uma vez que espécies de árvores podem beneficiar o solo em suas propriedades (e.g., fixação de nitrogênio atmosférico pela *Acacia mangium* Willd. (Galiana et al., 2002) e desenvolvimento de associações ectomicorrízicas nas raízes de *Eucalyptus urograndis* (Bieluczyk et al., 2021) ou podem gerar efeitos negativos, como por exemplo a redução do aporte de matéria orgânica ao limitar o desenvolvimento das culturas (e.g., alelopatia do *Eucalyptus urograndis* limitando a germinação de sementes de pastagem (Carvalho et al., 2015).

Para que os benefícios da presença das árvores sejam potencializados, o componente arbóreo e os demais devem interagir positivamente de modo a otimizar a produção de ambos. A complementaridade dessas interações está diretamente associada à adequação do dimensionamento em quantidade e disposição espacial das árvores (Nicodemo et al., 2004). Apesar do aumento do conhecimento sobre o desempenho agrônômico, zootécnico e econômico de SIPA com componente arbóreo nas últimas décadas, muito ainda há de se investigar para estabelecer o *design* destes sistemas para as condições de cultivo reguladas por climas tropicais e subtropicais, principalmente os locais que apresentam verões quentes e invernos secos. Nesse contexto, esses modelos de sistemas se apresentam mais complexos que as pastagens ou culturas anuais em monocultivo. A presença das árvores consorciadas com outro estrato vegetal, explorando o mesmo espaço acima e abaixo do solo juntamente com a presença dos animais, proporciona diversas interações que variam no tempo e espaço (Silva, 2012). A magnitude dessas interações é determinada pelos padrões de partição dos recursos (principalmente água, luz e nutrientes) e pela escala de tempo (e.g., idade das árvores) em que esses padrões são medidos (Gillespie et al., 2000; Bieluczyk et al., 2021).

No interior da comunidade vegetal, a radiação solar é o primeiro elemento meteorológico a ser modificado com a introdução de árvores. Como a radiação na faixa do visível (radiação fotossinteticamente ativa) é muito absorvida pela cobertura vegetal das árvores, pode haver limitações no desenvolvimento da pastagem ou cultura anual sombreada (Andrade et al., 2002), repercutindo em redução do potencial produtivo (competição por luz). A tolerância ao sombreamento é dependente da espécie agrícola ou forrageira. Por exemplo, a soja (Andrade et al., 2005) e o capim Piatã (*Urochloa brizantha*) apresentam melhor plasticidade que a cultura do milho (Bieluczyk, 2018), que é mais sensível a restrição de luz (Gao et al., 2020). Entretanto, nesses sistemas, estudos mostram que transmitâncias de radiação fotossinteticamente ativa menores que 60%, em posições normalmente próximas aos renques das árvores, têm causado perdas expressivas de produtividade nas pastagens e culturas agrícolas (Barro et al., 2008; Mendes et al., 2013; Nicodemo et al., 2016; Sousa et al., 2007; Pezzopane et al., 2019b; 2020b; Bieluczyk et al., 2021). Portanto, nesta situação se sugere que parte das árvores seja colhida, e sejam feitas podas nas outras remanescentes, para aumentar a entrada de luz no sistema e restabelecer a produtividade das culturas (Pezzopane et al., 2020a; Bieluczyk et al., 2021).

Ano/mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1°				1	1	1	1	1	1	2*	2	3
2°	3	3	4	4	4	4	5	5	5	2	2	2
3°	2	2	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6
4°	6	6	6	6	6	6	6	6	6	2	2	2
5°	6	6	6	6	6	7	6	6	6	2	2	2
6°	2	2	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6
7° ao 9°	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
10°	6	6	6	6	6	8						

Tabela 1. Esquema ilustrativo de um planejamento temporal de cultivo em sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) com eucalipto, soja, milho, braquiária e pastoreio de bovinos de corte em região do Cerrado. Fonte: adaptado de Bungenstab et al. (2014)

Legenda:

1. Implantação do sistema (amostragem, preparação do solo, calagem, correção da fertilidade).
2. Cultivo de soja.
3. Plantio de eucalipto enquanto a soja cresce (20m de distância entre renques e 1.5m entre árvores).
4. Após a colheita da soja o milho é plantado em consórcio com a braquiária em SPD.
5. O milho é colhido e a braquiária permanece para formar a cobertura do solo para o próximo plantio da soja em SPD.
6. Braquiária é mantida e os animais inseridos no sistema (a lotação animal no pasto é ajustada de acordo com a produção de biomassa da braquiária).
7. Metade das árvores de eucalipto é colhida (a distância entre árvores passa a ser de 3m) e vendida como madeira para combustível (providenciando maior entrada de radiação fotossintética ativa no sub-bosque).
8. O restante das árvores é colhido. Um novo ciclo se inicia.

*A época de semeadura da soja é dependente da disponibilidade termo hídrica de cada região.

Nota importante: Este arranjo espaço-temporal não é uma recomendação e sim apenas um esquema ilustrativo, no intuito de mostrar uma das inúmeras possibilidades de manejo em ILPF ao longo do tempo. Todo o sistema a ser planejado deve considerar as condições edafoclimáticas e mercado local, e ter acompanhamento de um profissional da área habilitado.

A dinâmica de água no solo em sistemas integrados, com a presença da árvore, depende do regime de chuvas da região e da configuração (arranjo) dos seus componentes, podendo apresentar características de manutenção de maiores teores de umidade no solo, ou de secamento mais rápido do solo (Sá, 1994; Wilson, 1998; Paciullo et al., 2008; Pezzopane et al., 2015; Bieluczyk, 2018). Vale salientar que as variações na umidade do solo ao longo das estações do ano, na presença da árvore, aumentam gradualmente com a aproximação aos renques das árvores. Em estações chuvosas, a recarga de água no solo é maior nesses locais, pois as árvores interceptam parte da chuva e conduzem a água pelos seus troncos. Avaliando a dinâmica sazonal da umidade do solo em diversas distâncias na entrelinha, Glatzle et al. (2021) encontraram menor umidade durante todo o ano na posição de um metro dos renques, e nesta posição os ciclos de umedecimento-secagem do solo

foram mais dinâmicos em camadas subsuperficiais do solo, podendo estar relacionados com o sistema radicular das árvores.

A adoção de sistemas arborizados associados à produção animal encontra-se no seu estágio inicial, sendo uma estratégia que tem sido fomentada por meio de linhas de financiamento específicas, a partir do “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). A linha de fomento governamental, assim como processos de certificação específicos para os sistemas silvipastoris e agrossilvipastoris, têm proporcionado o aumento de área de adoção, com inserção da árvore na última década.

2.1.5 Potencial funcional no solo e o manejo da biodiversidade na prática

A agricultura convencional reduz a biodiversidade do solo, causando danos na dinâmica de decomposição da fitomassa, da matéria orgânica do solo e da ciclagem de nutrientes, resultando em desequilíbrios nos processos ecossistêmicos e causando perdas significativas nos rendimentos das culturas (Tiemann et al., 2015). Neste cenário, incrementar a diversidade do cultivo de espécies por meio de rotações e consórcios de culturas, em sistemas de produção mais sustentáveis, tem sido um fator chave para a complementaridade nas interações acima e abaixo da superfície do solo, no aumento da resiliência e no potencial produtivo do sistema.

Incrementar a diversidade de plantas no sistema enriquece a quantidade e a qualidade de aporte de resíduos orgânicos, bem como diversifica a liberação de exsudatos radiculares no ambiente rizosférico, e possibilita novos habitats para os micro-organismos do solo (Khlifa et al., 2017; Cardoso e Andreote, 2016). Desta forma, aumentar o número de espécies vegetais conjuntamente com novos componentes vivos ao sistema de manejo (e.g., bovinos), impulsiona a atividade biológica e potencializa as funções que por eles possam ser desempenhadas (Cardoso e Andreote, 2016). Os SIPA intensificam e diversificam a produção e esse nível superior de biodiversidade traz efeitos positivos, como por exemplo maior biomassa microbiana e maior atividade enzimática (Steinauer et al., 2015), que estão diretamente relacionadas com o potencial funcional do solo. Recentemente, Tieman et al. (2015) demonstraram que o aumento da atividade microbiana no solo, decorrente da rotação e diversificação de culturas, esteve relacionado às melhorias na agregação do solo e no aumento dos teores de matéria orgânica. Esses efeitos são resultantes do trabalho biológico no solo que constrói as principais “engrenagens conectoras” para um bom funcionamento biogeoquímico no sistema. Sistemas diversos, como os SIPA, aumentam a heterogeneidade de organismos e a diversidade metabólica e funcional (Stefan et al., 2021) e melhoram significativamente a ciclagem dos nutrientes, a estruturação do solo,

a proteção de plantas e a promoção de crescimento vegetal (Cardoso e Andreote, 2016).

Nos SIPA, o consórcio de forrageiras ou culturas anuais, com as árvores e a rotação lavoura-pastagem, são alternativas que se enquadram perfeitamente no conceito de biodiversificação. Pesquisas recentes incluíram mais diversidade por meio de consórcios na fase pastagem no SIPA. Entretanto, para adotar essa prática é essencial que se faça o planejamento forrageiro, pois algumas características, como aceitabilidade, digestibilidade, volume e qualidade da forragem, são fundamentais para atender a demanda da produção pecuária. Laroca et al. (2018) testaram os efeitos de duas espécies de gramíneas e dois tipos de consórcio com leguminosas (Feijão Caupi e Guandu), na fase de pastagem de um SIPA, em atributos microbiológicos indicadores de qualidade do solo (Tabela 2). Os autores observaram aumento nos teores de C e N da biomassa microbiana e no conteúdo total de matéria orgânica sob consórcios entre gramíneas e leguminosas, quando comparados às forrageiras em cultivo solteiro. Adicionalmente, houve incremento na respiração basal e quociente metabólico dos microrganismos em áreas com gramíneas cultivadas de forma solteira, demonstrando maior estabilidade da microbiota sob consórcios em SIPA.

Gramíneas	Consórcios		
	Caupi	Guandu	Solteiro
	-----C-BM (mg C kg ⁻¹ solo)-----		
Tamani	793,2	574,9	369,4
Piatã	774,1	761,3	265,8
	-----N-BM (mg C kg ⁻¹ solo)-----		
Tamani	69,8	35,5	24,3
Piatã	44,8	47,8	23,5
	-----RB (mg C-Co ₂ kg ⁻¹ solo hora ⁻¹)-----		
Tamani	5,7	4,9	9,0
Piatã	9,5	3,5	11,2
	-----qCO ₂ ((mg C-Co ₂ Mg ⁻¹ C-BM hora ⁻¹) x 10 ⁻³)-----		
Tamani	7,2	8,9	24,3
Piatã	12,3	4,6	43,0
	-----qMIC (%)-----		
Tamani	2,6 n	1,9	1,8
Piatã	2,8	3,0	1,1

Tabela 2. Carbono da biomassa microbiana (C-BM), nitrogênio da biomassa microbiana (N-BM), respiração basal (RB), quociente metabólico (qCO₂) e quociente microbiano (qMIC) do solo em Sistema de Integração Lavoura Pecuária sob Plantio Direto, com consorcio na fase pastagem

Fonte: Laroca et al. (2018).

Além do efeito na dinâmica dos micro-organismos presentes no solo, a diversidade vegetal também pode incrementar a produtividade da cultura de grãos cultivada em sucessão, justamente em função das melhorias proporcionadas pela biodiversidade inserida e por meio das interações apresentadas na Figura 5 (conceitual). Contudo, ainda não há total compreensão de até que ponto as interações plantas-microorganismos influenciam no rendimento das culturas. Diante disso, é importante estudar como o manejo nos SIPA está alterando a estrutura da microbiota do solo, que comprovadamente apresenta elevada sensibilidade às alterações no agrossistema, e como a biologia do solo está relacionada à produtividade e eficiência do uso da terra.

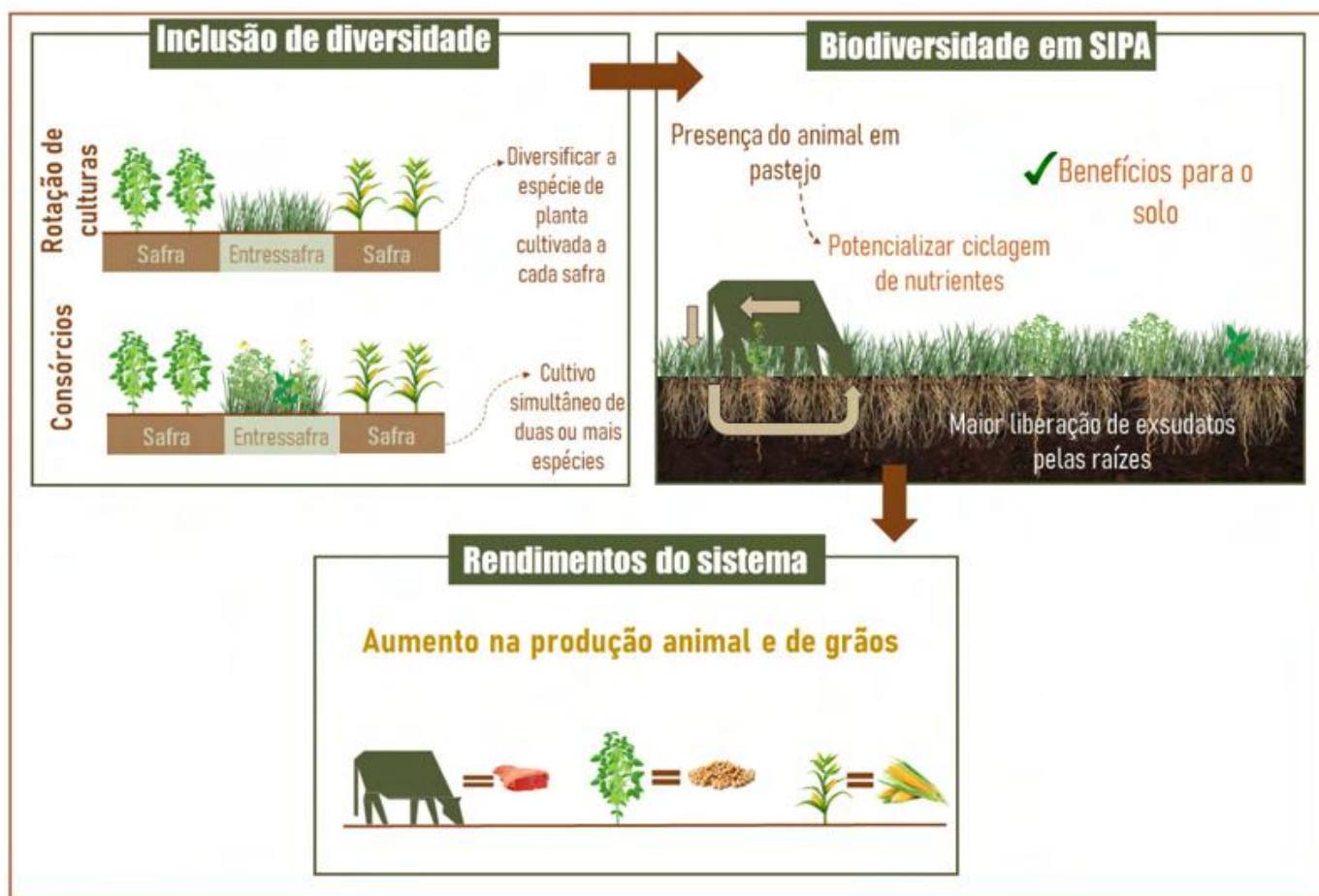


Figura 5. Esquema conceitual da influência da biodiversidade em SIPA sobre os rendimentos do sistema.

Fonte: elaborado pelos autores.

O manejo prático da biodiversidade do solo para o alcance dos benefícios acima supracitados é relativamente simples. Ele também se baseia nos três princípios da agricultura conservacionista: cobertura permanente do solo, rotação de culturas e revolvimento mínimo na linha de plantio (FAO 2014). Adicionalmente, a integração entre plantas, animais e árvores, bem como consórcios e cultivo entrelinhas, além de maximizar a diversidade biológica funcional, favorece o surgimento de diferentes espécies de microorganismos no

solo que desempenham a mesma função, ou seja, aumentam a redundância funcional. A redundância funcional é um “excesso indispensável” de organismos coexistentes que, taxonomicamente distintos, podem realizar a mesma função metabólica (Louca et al., 2018). Desta forma, em um evento de perturbação no agrossistema (*e.g.*, estiagem, mudança de pH, aplicação de defensivo agrícola, doença nas raízes), há a possibilidade de um grupo específico de organismos resistir a tais variações (*e.g.*, sobreviver em diferente faixa de pH), dando continuidade na sua função no solo (*e.g.*, decomposição da matéria orgânica), graças a esta redundância funcional. Finalmente, a diversidade metabólica e a redundância funcional dos microrganismos culminam na resiliência do ambiente edáfico, onde, mesmo após uma perturbação de impacto (*e.g.*, compactação superficial do solo por pastoreio) o microbioma do solo tem a capacidade de restabelecer as suas funções (*e.g.*, estruturação do solo). Portanto, incorporar componentes de biodiversidade nos SIPA consiste no manejo da vida no solo na prática, o que aumenta o potencial funcional do solo e pode resultar em ganhos emergentes de qualidade e saúde no ambiente edáfico.

2.1.6 Como a presença do animal pode modificar a qualidade do solo?

Os animais adicionam diversidade ao SIPA e também são considerados como catalisadores, por participar ativamente na dinâmica de decomposição e, conseqüentemente, da liberação de nutrientes de forma mais rápida e eficiente. Sabe-se que os herbívoros alteram a abundância, a composição, o tamanho, a arquitetura, a qualidade e a fenologia da vegetação, interferindo nos processos interativos com as plantas, e aumenta a abundância e a diversidade de organismos (Dias-Filho e Ferreira, 2009). A inserção dos animais influencia os indicadores físico-hídricos, químicos e biológicos do solo, e o fator chave é a adição de resíduos (fezes e urina), fonte de nutrientes para as plantas, macrofauna e microbiota. O aumento da disponibilidade desses nutrientes favorece o crescimento das raízes e o aumento da matéria orgânica, melhorando gradativamente a resiliência estrutural do solo.

A introdução de animais no sistema pode resultar em efeitos positivos (*e.g.*, resiliência, ciclagem de nutrientes, biomassa microbiana) ou negativos (*e.g.*, compactação superficial e acidificação do solo) sobre os atributos indicadores da qualidade do solo. Contudo, os efeitos positivos do SIPA têm sido maiores que os negativos, a destacar os relativos aos atributos físicos. Em um SIPA bem manejado há um maior volume de macroporos no perfil do solo (efeito de raízes), maior retenção de água e aumento da agregação do solo (efeito do acúmulo de C) (Bieluczyk et al., 2020; Salton et al., 2014). Entretanto, uma atenção deve ser dada aos indicadores físicos na camada de 0-10cm do solo porque o pisoteio excessivo pode compactar o solo, bloquear poros entre agregados e reduzir a infiltração da água.

A compactação superficial do solo em SIPA normalmente não atinge os limites críticos e o solo se reestrutura no período da lavoura (*e.g.*, Bonetti et al., 2019). Contudo,

sob altas intensidades de pastejo e/ou baixa cobertura do solo ocorre a redução da taxa de infiltração (Bonetti et al., 2019), o aumento do escoamento superficial e a erosão que têm ocorrido em áreas de regiões de climas tropicais e subtropicais (Didoné et al., 2014). Após 14 anos da implementação de um SIPA no Sul do Brasil, com soja na primavera/verão e aveia+azevém pastejado por bovinos no outono/inverno, houve uma forte redução da infiltração de água sob intensidade alta de pastejo (tratamento P10) (Figura 6a). Neste experimento de longa duração, a máxima infiltração de água foi observada na área sem pastejo (considerada 100%), com redução progressiva da infiltração de água com o aumento da intensidade de pastejo, sendo que na pastagem intensiva (P10) essa redução foi de 81% (Figura 6b). Portanto, neste experimento, o pastejo sob intensidade alta causou impactos físicos danosos ao solo. Considerando tais resultados, demonstrou-se mais uma vez que há a necessidade de manejar a carga animal corretamente para melhor manter os resíduos, proteger o solo e minimizar o efeito do pisoteio animal na sua superfície.

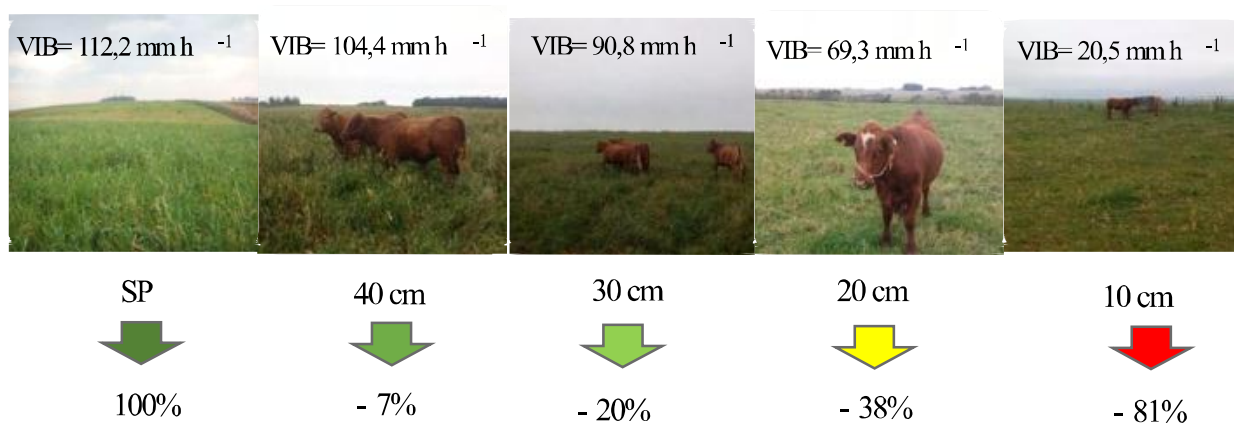
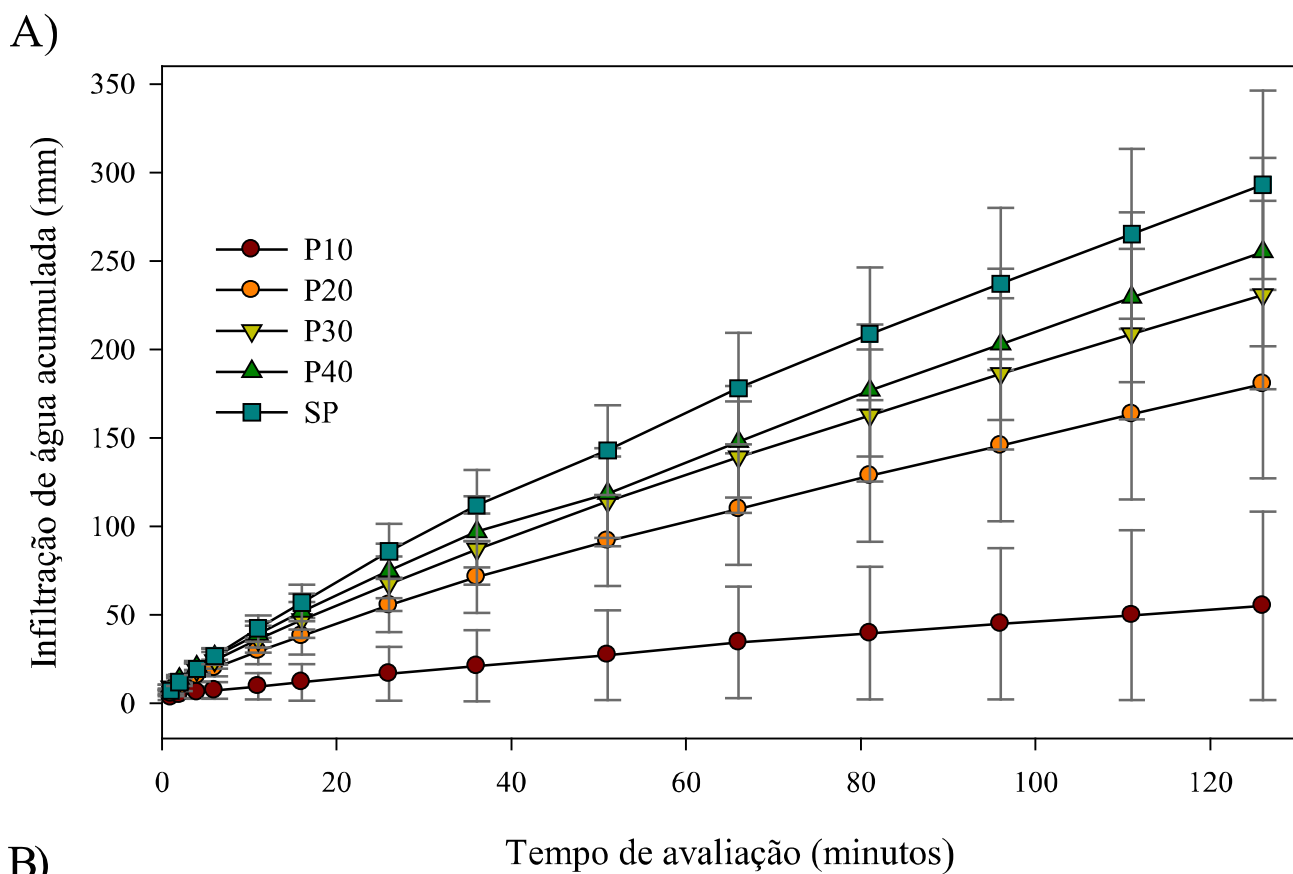


Figura 6. Infiltração de água acumulada no solo (a) e velocidade de infiltração básica (b) após o décimo quarto ano de pastejo em SIPA com diferentes intensidades de pastejo. **VIB**: velocidade de infiltração básica; **SP**: área com aveia + azevém no inverno sem pastejo; **10 cm**: área com pastejo intenso com carga animal 1306 kg de PV ha⁻¹; **20 cm**: área com pastejo intenso com carga animal 931 kg de PV ha⁻¹; **30 cm**: área com pastejo intenso com carga animal 614 kg de PV ha⁻¹; **40 cm**: área com pastejo intenso com carga animal 341 kg de PV ha⁻¹, todas na média de 10 anos. Barras indicam erro padrão.

A presença do animal em pastejo moderado favorece os ciclos do C, N e P e alterações na dinâmica de movimentação de nutrientes catiônicos (Ca, Mg e K), resultando em aumento da fertilidade do solo (Martin et al., 2016; 2020). Estas melhorias decorrem da maior ciclagem de nutrientes (discutido no tópico 2.1) e redução do efeito tóxico de

alumínio, ambos relacionados ao aumento de matéria orgânica do solo (Anghinoni et al., 2011; Assmann et al., 2014; 2015). Assmann et al. (2017) encontraram maiores quantidades de P (25 kg ha⁻¹) e K (130-180 kg ha⁻¹) reciclados e liberados de resíduos de pastagens e esterco sob intensidade leve de pastejo, em um ciclo de soja-bovinos de corte no Sul do Brasil. Ao promover maior desenvolvimento das raízes das forrageiras e favorecimento de organismos como os besouros (*Scarabaeidae*), o pastejo moderado produz mais poros e galerias no solo. Esses fatores facilitam a movimentação do calcário no perfil e têm colaborado para melhorar a eficiência da calagem superficial, quando realizada após a implementação, corrigindo o solo em camadas mais profundas.

A diversidade e abundância de organismos é ativada pelo pastejo dos animais em SIPA, principalmente decorrente da distribuição da sua urina e fezes sobre o solo (Martins et al., 2015). Muito já se tem discutido, neste capítulo, sobre os efeitos do pastejo aliado à diversificação de plantas nas propriedades biológicas do solo. Foi visto que, a presença do animal em um manejo apropriado sob SIPA, e as interações destes com as pastagens e árvores, pode promover aumento da estrutura e diversidade das comunidades microbianas.

2.2 Adubação de sistemas e manejo da qualidade do solo

2.2.1 Ciclagem de nutrientes e adubação de sistemas

A ciclagem de nutrientes é uma das propriedades mais reconhecidas dos SIPA. Consiste no fluxo de nutrientes entre os compartimentos (atmosfera-planta-animal-solo-água) do sistema de produção e envolve uma série de processos em ciclos biogeoquímicos. Na literatura, se identifica que a ciclagem de nutrientes em sistemas puramente agrícolas é distinta de sistemas integrados de produção, principalmente em função da inserção do animal no sistema. Neste sentido, o animal em pastejo é fundamental na ciclagem de nutrientes, pois atua como um agente catalisador, que modifica as taxas e os fluxos dos nutrientes, reciclando o material orgânico, determinando a dinâmica dos nutrientes entre os seus compartimentos (Anghinoni et al., 2013; Carvalho et al., 2010).

Quando os animais entram no sistema, tendem a desacoplar os ciclos de carbono e nitrogênio (*i.e.*, separar as moléculas de C das moléculas de N), pela liberação do carbono digestível, como CO₂ e CH₄, e pelo retorno do nitrogênio digestível na forma de urina (Soussana e Lemaire, 2014). Entretanto, para direcionar a um equilíbrio e manter parte da cobertura vegetal, protegendo fisicamente a superfície do solo, é necessário que parte do carbono vegetal permaneça intacto, sem esta desacoplagem. Portanto, as alterações na ciclagem de nutrientes e proteção física do solo, decorrentes da adoção do SIPA, se devem a um processo contínuo em que a magnitude e a direção dependem principalmente do manejo dos animais em pastejo (Anghinoni et al., 2013). Daí a importância em se manter

intensidades moderadas de pastejo, favorecendo a ciclagem de nitrogênio e ganho em produtividade, levando ao sequestro de carbono no solo (Anghinoni et al., 2017).

A massa de forragem residual é uma importante variável de conexão durante a transição entre as fases de pastagem e cultivo em SPD (Kunrath et al., 2020). Por isso, o manejo da intensidade de pastejo é um fator chave, que afeta a dinâmica dos nutrientes em sistemas integrados. Sob intensidades moderadas de pastejo, os herbívoros favorecem a ciclagem de carbono e nitrogênio no solo (Assmann et al., 2015) e a maior produção de biomassa da forrageira ao longo do tempo e, conseqüentemente, o aumento na liberação de nutrientes, como fósforo e potássio (Assmann et al., 2017c). As excretas dos animais (esterco e urina), e os resíduos vegetais diversos (remanescentes do pasto e da cultura comercial em sucessão/rotação) liberam nutrientes para a solução do solo em diferentes formas e velocidades, o que potencializa os ciclos biogeoquímicos e da matéria orgânica do solo.

Os animais em pastejo devolvem de 70% a 95% dos nutrientes ingeridos ao sistema via fezes e urina, exportando quantidades mínimas de nutrientes na carcaça (Haynes e Williams, 1993; Whitehead, 2000). Somente considerando o esterco, cerca de 90% do K, 30-60% do P e 10-55% do N contidos nos dejetos são disponíveis para as culturas subsequentes (Maff, 2000). Assim, os nutrientes aplicados em uma adubação na fase pastagem, que potencializa o crescimento de forragem, têm um elevado retorno ao solo pelos processos de ciclagem de nutrientes, e tornam-se prontamente disponíveis para a cultura de grãos em sucessão (Alves et al., 2019).

Os SIPA, se bem manejados, também garantem menores perdas de nutrientes no perfil do solo. A mudança na estrutura radicular das forrageiras, as quais, sob o estímulo de pastejo, investem mais em raízes finas (Reeder e Schuman, 2002; López-Mársico et al., 2015), minimizam possíveis perdas de nutrientes por lixiviação. Martins et al. (2014) identificaram que, em sistema puramente agrícola (monocultivo de soja e planta de cobertura na entressafra), as perdas de cálcio e magnésio foram 45% e 35% superiores a um SIPA com pastejo na entressafra, respectivamente.

Diante do maior potencial de ciclagem de nutrientes e da maior eficiência do seu uso na fase de pastagem em SIPA, uma nova abordagem sobre adubação tem emergido – a “adubação de sistemas”. Esta abordagem obrigatoriamente considera todos os benefícios de um pastoreio bem manejado durante a fase de pastagem, incluindo as mínimas exportações de nutrientes pelos animais e a reciclagem de nutrientes, retornados ao solo via excreta (Haynes e Williams, 1993).

O conceito de “adubação de sistemas” tem como base a ciclagem biológica de nutrientes entre as fases de rotação, buscando a máxima eficiência de uso de nutrientes, por evitar perdas e aumentar gradativamente a fertilidade do solo, podendo culminar em menor adubação utilizada no sistema (Assmann et al., 2017b). Esta abordagem contrasta

com o típico paradigma de adubação especificamente para uma cultura, a qual, na maioria das vezes, é feita para a cultura de grãos. A “adubação de sistemas” considera a interação entre todas as culturas envolvidas na rotação (pastagens e culturas agrícolas) na busca por um “momento ideal” e de máxima eficiência da prática da adubação. Assim, o fertilizante deve ser aplicado na fase do sistema que apresenta menor exportação de nutrientes e maior capacidade de ciclagem, a fim de maximizar a produção total do sistema (Assmann et al., 2017a, b; Denardin et al., 2020b; Farias et al., 2020). E esta fase em SIPA, como discutido anteriormente, é a fase de pastagem.

Além de beneficiar a ciclagem dos nutrientes, a adubação com fósforo e potássio na fase pastagem pode aumentar a produção total de forragem em até 18%, como ocorreu no estudo de Farias et al. (2020). A adubação na pastagem permite manter uma massa foliar suficiente para estimular o rebrote de novos perfilhos que estavam anteriormente sombreados, aumentando a produção total de forragem (Lemaire, 2001). Neste sentido, muitos estudos têm confirmado o efeito residual da adubação na fase pastagem para culturas de grãos cultivadas em sucessão. Denardin et al. (2020a; 2020b), identificaram ausência de resposta em produtividade de grãos de arroz irrigado e soja à adubação com fósforo e potássio na fase pastagem, em sistemas integrados conduzidos em terras baixas. Dessa forma, “adubação de sistemas” (realizada na fase pastagem) melhora a produção de forragem e animal (Farias et al., 2020), sem reduzir a produtividade da soja cultivada em sucessão ou a fertilidade do solo (Denardin et al., 2020a). Vale ressaltar, no entanto, que a “adubação de sistemas” é uma abordagem recente, com carência de informações na literatura científica. Embora alguns grupos de pesquisas já utilizem essa metodologia de adubação em experimentos com SIPA, a pesquisa avaliando isoladamente a sua eficiência ainda é deficiente. Por isso, ainda há demanda de muitos estudos científicos para recomendações específicas, como a melhor forma e momento da adubação, em função de diferentes arranjos produtivos. Normalmente, tem-se realizado em experimentos a realização da adubação de reposição com P e K no estabelecimento da pastagem, fornecendo-se quantidades equivalentes às exportadas no cultivo de grãos anterior.

As forrageiras, utilizadas na fase pastagem, apresentam maior eficiência de uso da adubação nitrogenada quando comparadas às culturas anuais, ocorrendo menores perdas de N na forma de nitrato e por volatilização de amônia (Simmelsgaard, 1998). Segundo Thomason et al. (1988), enquanto a eficiência de uso de N pela pastagem pode chegar a 77%, nas culturas de grãos este valor fica próximo aos 31%. Desta forma, investir na adubação nitrogenada em fase pastagem do SIPA pode ser uma estratégia para melhor ciclar o N, por meio do aumento da eficiência do uso pela forragem (Thomason et al., 1988) e retorno do N ao solo após o pastejo dos animais (Maff, 2000).

O efeito principal resultante da adubação nitrogenada na fase pastagem de SIPA é o incremento na produção de forragem (Lançanova et al., 1988; Martins et al., 2000). Sartor et

al. (2014) constataram que a aplicação de 200 kg ha⁻¹ de N resultou em um aumento de 45% na produção de matéria seca de Papuã (*Urochloa plantaginea*), atingindo uma produção de aproximadamente 20,0 Mg ha⁻¹. A maior produção de forragem, conseqüentemente aumenta a capacidade de suporte da pastagem e a produção animal. Em um sistema integrado, onde foi avaliada a influência da adubação nitrogenada em uma pastagem na entressafra, constatou-se que, doses de N de 0 a 300 kg ha⁻¹, aumentaram o ganho de peso vivo animal de 480 para 656 kg ha⁻¹ durante 93 dias de pastejo (Assmann et al., 2004).

Além dos ganhos relacionados à produção animal, a adubação nitrogenada também pode apresentar efeito residual, podendo reduzir ou até mesmo eliminar a necessidade de adubação nitrogenada no cultivo de gramíneas em sucessão. No Sul do Brasil, muitos estudos têm confirmado este efeito residual de adubação nitrogenada de pastagens de inverno nas culturas de grãos cultivadas em sucessão no SIPA. Assmann et al. (2003) constataram que a produtividade de grãos de milho, sem fazer adubação nitrogenada, foi de aproximadamente 10 Mg ha⁻¹ ao aplicar o nitrogênio na fase anterior de pastagem de azevém e aveia. Para atingir esta mesma produtividade de milho, quando a pastagem anterior não foi adubada, se necessitou da aplicação de 200 kg ha⁻¹ de N durante a fase lavoura. Adicionalmente, ao aplicar N na lavoura após a pastagem ter sido adubada com 225 kg ha⁻¹ N, Sandini et al. (2011) não encontraram aumento de produtividade do milho, permanecendo com 13 Mg ha⁻¹ de grãos.

Os resultados aqui apresentados são muito importantes para o conhecimento dos potenciais benefícios da utilização dos SIPA. Tais resultados demonstram a eficiência e o efeito residual da adubação nitrogenada, potencializando a ciclagem de N entre os compartimentos do sistema produtivo. Em função da maior eficiência da adubação nitrogenada e reaproveitamento do N em cultivos em sucessão, há evidências de que a “adubação de sistemas” pode também ser utilizada para adubação nitrogenada. No entanto, é importante ressaltar que a maioria dos resultados foi obtida em solos com altos teores de matéria orgânica e com histórico de longo prazo em manejos conservacionistas e diferentes rotações de culturas. Assim, embora a “adubação de sistemas” esteja mais consolidada, considerando nutrientes como o P e K, a dinâmica do N no solo e da adubação nitrogenada é distinta, e estritamente relacionada ao teor de matéria orgânica do solo. Portanto, em função dos incrementos nesse atributo de solo ocorrerem no longo prazo, a adoção da “adubação de sistemas” com adubação nitrogenada possivelmente demanda um maior tempo para adoção em SIPA, quando comparada à adubação fosfatada e potássica.

2.2.2 A atividade enzimática do solo favorecendo a eficiência do uso de fertilizantes

Os microrganismos do solo desempenham um papel essencial nos processos biogeoquímicos e, portanto, no desenvolvimento de plantas. Neste contexto, algumas enzimas do solo são sensíveis aos fatores naturais e antrópicos (*e.g.*, manejo do solo em SIPA) e integradoras dos componentes biológicos no ecossistema (Mendes et al., 2020). Portanto, constituem uma ferramenta robusta para avaliar as alterações promovidas pelo manejo dos solos (Liu et al., 2021).

Estudos recentes indicam que incrementar a atividade biológica do solo promove aumento na produtividade das culturas, mesmo não havendo diferenças nas propriedades químicas e/ou físicas do solo, portanto, tais organismos são mais sensíveis ao manejo em curto prazo (abordado em detalhes no capítulo 7). A importância de se conhecer a atividade enzimática do solo em SIPA aumenta à medida que a presença do animal estimula à atividade microbiana, que está diretamente relacionada à produção de enzimas e ciclagem dos nutrientes no solo. Quantificar enzimas relacionadas aos principais ciclos biogeoquímicos, como do carbono (β -glicosidase), do enxofre (arilsulfatase) e do fósforo (fosfatases), tem se mostrado uma ferramenta eficiente, se associada aos usuais atributos físicos e químicos do solo, para aprimorar a avaliação da saúde do solo (Mendes et al., 2020). As enzimas arilsulfatase e β -glicosidase estão sendo avaliadas para serem incluídas nas análises de rotina da fertilidade, sendo os seus resultados calibrados em classes para interpretá-los para culturas anuais e correlacionadas com a produtividade (Mendes et al., 2018; 2020).

A enzima β -Glicosidase atua na etapa final da degradação da celulose, liberando como produto a glicose (importante fonte de energia para os microrganismos) fazendo a hidrólise de celobiose (Makoi e Ndakidemi, 2008). A atividade β -Glicosidase pode ser influenciada por diversos fatores, como a temperatura do solo e pH, além da qualidade e conteúdo de matéria orgânica (Tabatabai, 1994). Em sistemas de manejo conservacionistas em SPD, como o SIPA, uma maior atividade da β -Glicosidase tem sido correlacionada positivamente com um maior aporte de matéria orgânica ao solo (Yuan et al., 2020; Zhang et al., 2015; Laroca et al., 2018) e maior diversidade de plantas no sistema (Franco et al., 2020). Neste sentido, converter sistemas convencionais de cultivo para SIPA, intensificando e diversificando a produção, tem resultado em um incremento de 1,2 a 2,1 vezes a atividade da β -Glicosidase (Damian et al., 2021). Pires (2021) encontrou maior atividade da β -Glicosidase (25%) com a adubação de sistema (realizada na fase pastagem) quando comparada à convencional (realizada na cultura da soja) (Figura 7). A adubação fosfatada e potássica na pastagem potencializou o aporte de matéria orgânica via parte aérea, raízes, e excretas animais, e aumentou o substrato para a atividade desta enzima.

A introdução da árvore no SIPA tem resultado em variações na atividade da

β -Glicosidase ao longo da entrelinha dos renques. Zago et al. (2019) verificaram que a atividade de β -Glicosidase foi maior quando as árvores foram introduzidas, havendo diferenças mais expressivas na estação chuvosa. Sarto et al. (2020c) verificaram que em locais próximos ao *Eucalyptus urograndis* a atividade desta enzima foi similar à monocultura de pastagem, entretanto em posições mais centrais da entrelinha houve incrementos significativos na sua atividade.

A arilsulfatase participa no ciclo do enxofre (S) no solo e ao hidrolisar ligações do tipo éster de sulfato, promove a liberação de íons de sulfato (Tabatai e Bremner, 1970). Desta forma, a arilsulfatase controla a mineralização do S orgânico, este que compõe de 90% a 98% do S total no solo (Chen et al., 2019). A arilsulfatase é fortemente correlacionada com os teores de C no solo e decresce em atividade conforme a profundidade do solo aumenta (Deng e Tabatabai, 1997). Damian et al. (2021) verificaram que a conversão de sistema convencional de preparo ou pastagem adubada para SIPA com lavoura e pecuária duplicou a atividade da arilsulfatase sob clima tropical úmido no Mato Grosso do Sul. Os autores também verificaram que a arilsulfatase foi a enzima (dentre β -Glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase) que mostrou a maior relação com efeitos positivos sobre a comunidade bacteriana do solo. Ambos favorecidos por fontes diversas e quantidade de substrato orgânico benéficos para a atividade microbiana do solo em SIPA. Por outro lado, nos SIPA com adubação convencional ou de sistemas não houve alteração na atividade da arilsulfatase (Pires, 2021), mostrando que, neste caso, a β -Glicosidase parece ser a enzima que melhor responde a adubação na fase pastagem.

A fosfatase ácida (enzima relacionada ao ciclo do P - mais comum em solos com pH < 7) é influenciada pela demanda deste nutriente no solo. Em condições com menor utilização de fertilizantes fosfatados os microrganismos aumentam a produção da enzima. A fosfatase tem sua atividade diminuída com a aplicação de fertilizantes fosfatados (Lopes et al., 2013) e pode ser inibida em teores muito elevados de P disponível no solo.

À medida que ocorre maior aporte de resíduos vegetais (parte aérea, raízes e exsudatos radiculares) e animais (esterco) há um favorecimento de um ambiente no solo biologicamente mais ativo. Portanto, também pode haver maior produção da enzima fosfatase. A conversão do SPD para SIPA com rotação entre braquiária e soja incrementou valores de fosfatase ácida no solo (Portilho et al., 2015). A utilização da adubação de sistemas em relação à convencional aumentou a fosfatase ácida em 28% (Figura 7). A intensificação na atividade da fosfatase ácida, nestes solos com uma dinâmica acelerada da matéria orgânica, muito provavelmente, está associada a uma maior ciclagem dos nutrientes no solo. A melhoria nesses atributos é apenas um dos frutos da resiliência aliada à redundância funcional de organismos no solo em sistemas diversificados. Contudo, vale destacar que, para interpretar os resultados da fosfatase, muito cuidado deve ser tomado, pois baixos valores podem estar diretamente relacionados a uma adubação recente no sistema.

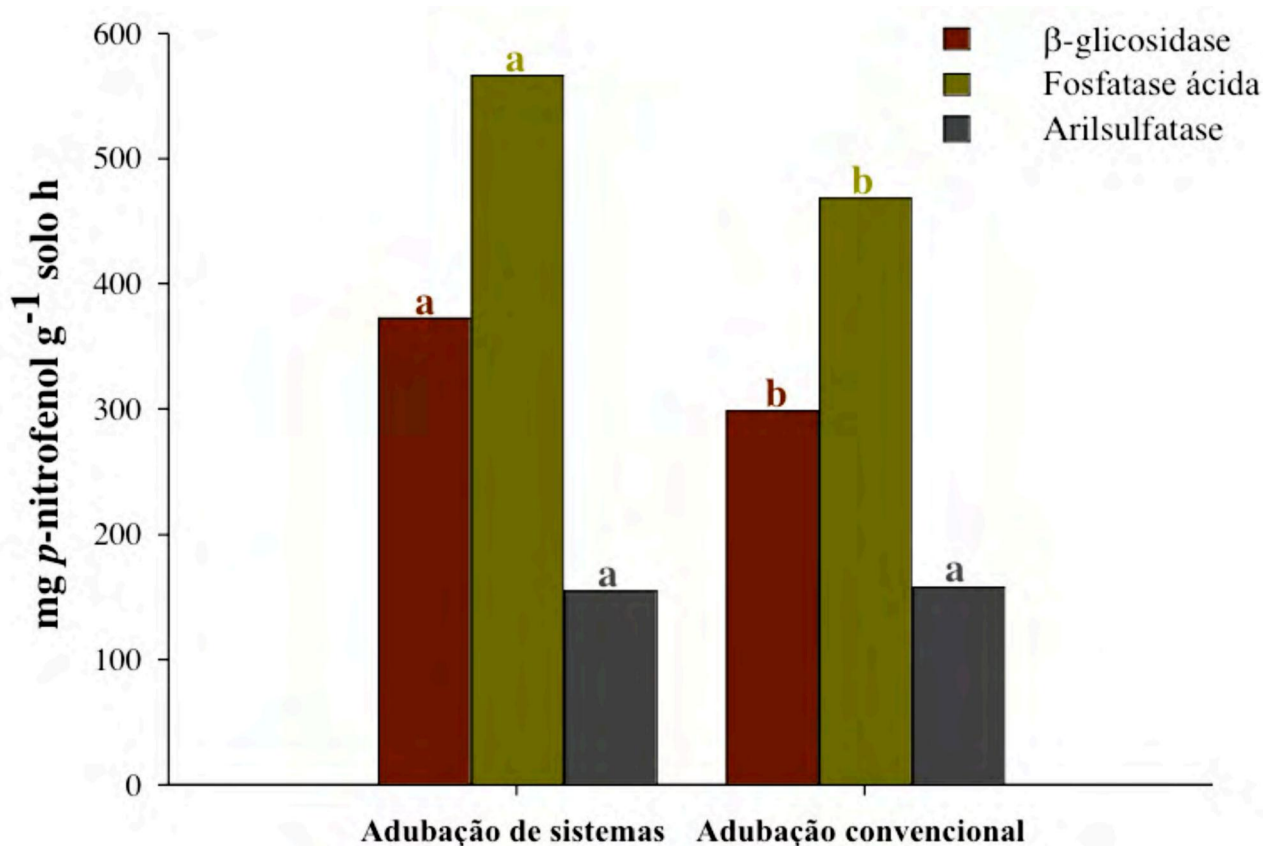


Figura 7. Atividade enzimática da β-glicosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase em sistema integrado de produção agropecuária sob adubação convencional (na soja) e adubação de sistemas (no pasto). Fonte: Adaptado de Pires (2021).

A atividade enzimática dos microrganismos melhora a eficiência do uso dos fertilizantes. As iniciativas que priorizam um manejo do solo de forma mais sustentável, com princípios conservacionistas, não deveriam dispensar a inclusão de análises biológicas nos solos dos agrossistemas. Entretanto, ainda são necessários mais estudos para o entendimento da dinâmica dessas enzimas no solo. Nem sempre a maior atividade enzimática indica melhorias na qualidade do solo, tornando necessária uma avaliação mais criteriosa e relacionada a outros atributos de solos. Ampliando o conhecimento sobre estes processos se pode traçar estratégias de manejo mais eficientes no SIPA, aperfeiçoando a adubação, a construção da fertilidade do solo, a escolha de espécies, dentre outras melhorias.

2.3 Manejo do solo e os reflexos em sustentabilidade nos sistemas integrados

2.3.1 Intensificação: eficiência econômica e melhorias ambientais em sistemas integrados

Sustentabilidade em sistemas agrícolas é a produção de alimentos e/ou fibras de forma lucrativa, conciliando com a eficiência na utilização de recursos da natureza (Hendrickson et al., 2008). Nesse sentido, a integração dos componentes agrícola, pecuário e/ou florestal tem efeitos positivos sobre o agroecossistema, minimizando os impactos

ambientais negativos (Carvalho et al., 2010), por meio da estabilidade e diversidade de produção, ciclagem e eficiência de uso dos nutrientes, e melhoria da qualidade do solo, resultando em um aumento da produção de alimentos por unidade de área (Bieluczyk et al., 2020; Farias et al., 2020).

Os animais são capazes de aumentar e diversificar a produção, convertendo fontes vegetais em alimentos, tais como carne e leite (Mottet et al., 2017). Esses sistemas podem aumentar tanto a produção individual dos cultivos, quanto à produção geral do sistema, reduzindo os riscos e os impactos ambientais (Carvalho et al., 2018). Segundo Moraes et al. (2014), o rendimento de grãos de culturas anuais cultivadas em sucessão ou rotação com pastagens é superior quando comparado a áreas não pastejadas, demonstrando que o pastoreio afeta de maneira positiva o rendimento dos grãos dos cultivos subsequentes. No mesmo sentido, Carvalho et al. (2018) encontraram aumentos no rendimento de grãos de soja, feijão, arroz irrigado e milho em 3,4%; 4,7%; 10,4% e 10,8% em média, respectivamente, quando da introdução de pastagens em rotação com culturas de grãos. Os raros relatos de maior produção de grãos em áreas não pastejadas têm sido identificadas, sob condições metodológicas inadequadas, principalmente a falta de adubação de pastagens e/ou intensidades de pastejo inadequadas (Moraes et al., 2014).

Um dos aspectos que mais valoriza e justifica o uso dos SIPA é, justamente, a sua eficiência no uso dos nutrientes fornecidos por meio de fertilizantes. Além da possibilidade de incrementos na produção individual de cada cultivo, a adoção de SIPA aumenta a eficiência de uso dos nutrientes. Quando o ganho da produção animal de carne é convertido em equivalente grãos e adicionado ao rendimento de soja, o resultado representa um aumento de 58% em relação ao sistema sem introdução do animal (Farias et al., 2020).

Em geral, os SIPA garantem maior retorno, seja econômico ou na produção de alimentos e fibras (Figura 8), em uma mesma área, com uma mesma quantidade de nutrientes fornecidos. Observou-se um maior retorno econômico da adubação fosfatada, ao longo de cinco anos de avaliação, em um SIPA com soja no verão e bovinocultura de corte no inverno, quando comparado a um sistema puramente agrícola (somente soja no verão) (Figura 8a). Da mesma forma, o SIPA aumentou a eficiência do uso nutrientes, otimizando o uso de Ca e Mg, produzindo maior quantidade de proteína por quilo de nutrientes (Figura 8b).

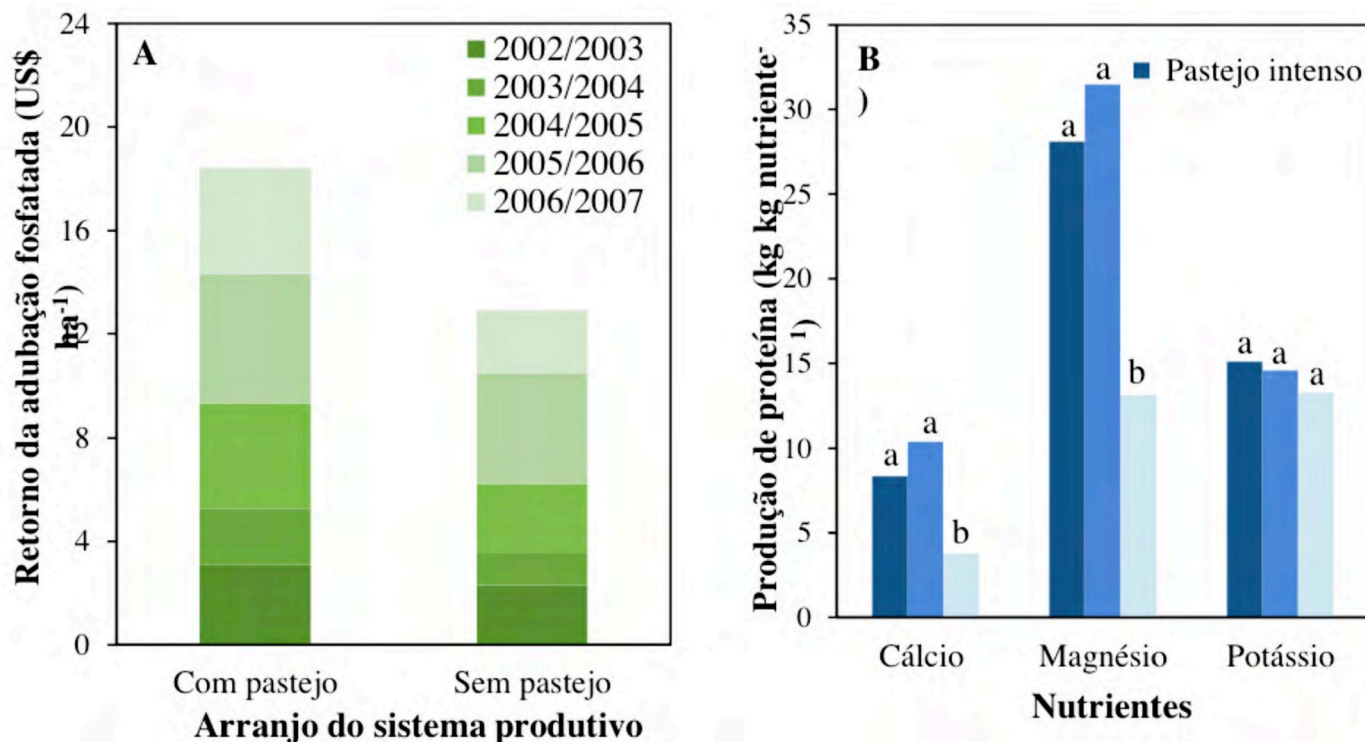


Figura 8. Eficiência da adubação fosfatada, pelo retorno econômico de cada US\$ 1 ha⁻¹ investido na aplicação de fósforo (A), e de uso dos nutrientes cálcio, magnésio e potássio, pela produção de proteína a cada 1kg de nutriente “gasto”, em sistema com produção de soja no verão e pasto misto de aveia preta + azevém no inverno, com diferentes manejos da pastagem hiberna. Fonte: Adaptado de Costa et al. (2014) (A) e Martins et al. (2014) (B). ⁽¹⁾ Letras iguais indicam ausência de diferença significativa pelo teste de Tukey, a um nível de 5% de significância.

Segundo Farias et al. (2020), um arranjo de SIPA com cultivo de soja no verão e pastagens hibernais no inverno é, em média, 16% mais eficiente no uso de fertilizantes nitrogenados e fosfatados e 32% mais eficiente no uso de fertilizante potássico, em comparação com o sistema que contém apenas planta de cobertura no inverno. Resultados de experimentos com arroz irrigado cultivado após pastejo bovino por diferentes períodos e locais do Rio Grande do Sul (Carmona et al., 2016), demonstram que a resposta do arroz à adubação (N-P-K) diminuiu sensivelmente (de 2,1 a 0,8 Mg ha⁻¹) com o tempo de pastejo (2 a 16 anos). Da mesma forma, o custo da adubação em relação àquela indicada pela análise do solo diminuiu 43% na média dos quatro locais para uma mesma produtividade (11,1 Mg ha⁻¹) (Carmona et al., 2016).

Além dos ganhos do sistema (Figura 8), também existem evidências de maior eficiência na utilização de nutrientes para a cultura de grãos da fase lavoura do SIPA. No contexto das terras baixas, Denardin et al. (2020a), avaliando a eficiência de uso da adubação pelo cultivo do arroz irrigado sob SIPA, identificaram eficiências de uso de nitrogênio, fósforo e potássio sendo 25%, 23% e 20% superiores no sistema integrado em relação ao sistema conduzido sob monocultivo do arroz. Isto indica uma menor dependência da adubação no arroz quando precedido de pastagens adubadas. Esses

estudos demonstram que, além de aumentar a produção de alimentos, a adoção desses sistemas pode alterar a dependência por fertilizantes, reduzindo custos e aumentando a sustentabilidade econômica e ambiental.

Os benefícios desses arranjos produtivos não são somente de garantir um sistema mais eficiente, mas também apresentam uma relevância ambiental considerável. Em adição, o aumento da eficiência econômica dos SIPA também está relacionado às melhorias ambientais proporcionadas por esses sistemas. Além dos custos relacionados aos fertilizantes, os SIPA podem otimizar o uso de outros insumos. Devido às mudanças na distribuição espacial dos recursos ao longo do tempo, os SIPA podem alterar as comunidades de inimigos naturais. Em pequena escala, a ação de animais produz micro-habitat por meio de ações como o pisoteio (Hopkins e Holz, 2006) ou a deposição de dejetos (Anghinoni et al., 2013), que servem de habitats secundários para espécies de ecossistemas jovens e dinâmicos. A maior biodiversidade encontrada em sistemas complexos concebe um ambiente com maior resiliência, ou seja, com maior resistência e capacidade de recuperação de estresses, como surtos de pragas, doenças e plantas daninhas (Martins et al., 2018). Nesse sentido, um experimento de nove anos avaliou o efeito da introdução da pastagem e do número de culturas na rotação em um sistema produtivo, no banco de sementes, infestação de plantas daninhas e na produtividade de grãos (Davis et al., 2012). Nesse contexto, o sistema de rotação de quatro anos, com lavouras e pastagens [milho – soja – consórcio alfafa (*Medicago sativa*) + gramíneas (triticale ou aveia) – alfafa] reduziu a necessidade de uso de herbicida para aproximadamente 13% em relação ao esquema mais curto e apenas com lavoura, de dois anos. Isso se deve, basicamente, ao maior tempo de cobertura vegetal, através da introdução de uma cultura perene. Pastagens perenes podem ser usadas para redução de algumas plantas invasoras em SIPA, como uma alternativa ao uso de herbicidas, de forma sustentável e rentável (Meiss et al., 2010), em um exemplo claro do benefício da fase pastagem/pecuária para a fase lavoura.

Ainda mais diversos que os SIPA que integram apenas a lavoura e a pecuária, são os SIPA que integram a componente florestal. A inclusão da produção animal em sistemas florestais pode aumentar os índices de diversidade e riqueza de espécies da fauna edáfica (Ford, 2016), além de benefícios “diretos” da alimentação dos animais. Na integração fruti-ovinocultura, a redução da incidência de pragas e doenças ocorre via consumo do material decomponível que possa favorecer a disseminação de pragas (Guimarães-Filho e Soares, 2003).

O manejo de sistemas de produção baseados na diversificação e integração de cultivos aumenta a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos prestados por seus integrantes, reduzindo a dependência do uso de pesticidas e, conseqüentemente, o risco de contaminação do solo, água e atmosfera. Assim, os SIPA são capazes de, ao mesmo tempo, intensificar a produção de alimentos e biomassa vegetal, aumentar a biodiversidade,

reduzindo a dependência de fertilizantes e pesticidas, aumentando a eficiência econômica de sistemas de produção.

2.3.2 Sistemas integrados como ferramenta essencial para o Brasil cumprir com os acordos internacionais sobre o clima

Há enormes desafios para os sistemas de produção agropecuários como combater a degradação ambiental e as mudanças climáticas, que por sua vez, têm o potencial de reduzir a produção agrícola. Somado a isso, em 2050, o setor deverá produzir cerca de 50% mais alimentos do que em 2012 para atender à demanda global (FAO, 2017). Portanto, há uma pressão crescente para atender às necessidades da população, e dessa forma a adequação dos sistemas agrícolas são urgentes e necessárias (Ramankutty et al., 2018, Rockström et al., 2016). A capacidade do solo para a produção de alimentos aliado ao potencial de mitigação das mudanças climáticas tem despertado atenção especial no contexto dos problemas ambientais atuais (Vermeulen et al., 2019).

A agricultura é uma importante fonte de Gases de Efeito Estufa (GEE) que contribuem para as mudanças climáticas globais (Le Quéré et al., 2016). As emissões de GEE da agricultura têm origem no desmatamento, degradação das terras, uso de máquinas movidas a combustível fóssil, fabricação e distribuição de fertilizantes químicos e emissões de metano da pecuária e da cultura do arroz irrigado (Batjes, 2019). Por outro lado, há vários relatos indicando que sistemas de produção bem manejados também podem ser um importante sumidouro de CO₂ atmosférico (Sá et al., 2017; Salton et al., 2014; Bieluczyk et al., 2020).

Todos os solos estão sujeitos a algum grau de perturbação humana, seja diretamente por meio do uso e manejo, ou indiretamente por meio de respostas às mudanças globais induzidas pelo homem, como poluição e mudanças climáticas (Smith et al., 2016). De acordo com Houghton et al. (2009), o solo é o maior reservatório de C terrestre, armazenando cerca de 1500 Pg C na camada até um metro de profundidade. Segundo os autores, este valor representa de duas a quatro vezes mais C do que o reservatório combinado de biomassa acima e abaixo do solo, as estimativas variam de 385 a 650 Pg C. Além do armazenamento de carbono, os solos também são essenciais para manter o ciclo do carbono na biosfera e para garantir a segurança alimentar global (FAO, 2015).

Diante desse cenário de desafios para a agricultura, o Brasil comprometeu-se na *Conference of the Parties* (COP 15), em 2009, com a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). A partir de então foi instituída a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), e em 2010, foi elaborado 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 (Brasil, 2012; Sá et al., 2017). As ações do Plano ABC, para

produção agropecuária com baixa emissão de carbono, incluem a recuperação de pastagens degradadas; adoção de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (ILP e ILPF) e Sistemas Agroflorestais (SAFs); adoção do Sistema Plantio Direto (SPD); difusão da Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN); expansão da área de florestas plantadas; e tratamento de dejetos animais. Estas práticas têm sido recomendadas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas para reduzir as emissões de carbono associadas às mudanças no uso da terra e atingir as metas propostas pelo Acordo de Paris (IPCC, 2015).

O uso sustentável do solo não depende apenas de ações locais de produtores e técnicos, mas também do desenvolvimento e implementação de políticas de proteção ambiental e mitigação das emissões de GEE amplamente adotadas em nível global ou regional (Juerges e Hansjürgens, 2018; Montanarella, 2015). No entanto, uma abordagem e uma estrutura legal baseada na proteção contra ameaças à degradação do solo não são suficientes para manter as funções múltiplas do solo. A degradação do solo, com seus impactos, custos e problemas sociais, econômicos e ambientais associados, exige financiamento regional e global de longo prazo, mobilização de recursos e especialização muito além das soluções disponíveis para os usuários locais (Juerges e Hansjürgens, 2018). Em resposta à necessidade de uma abordagem global, a FAO estabeleceu, em 2012, a *Global Soil Partnership* (GSP) para desenvolver sinergias entre organizações nacionais e internacionais para uma ação global para estimular o uso sustentável dos recursos do solo (Montanarella, 2015). Outra iniciativa, o “4 per mille Soils for Food Security and Climate” lançada em Paris, França, na COP 21 (Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas, em 2015) tem objetivo de aumentar os estoques globais de matéria orgânica do solo em 4 por 1000 (ou 0,4%) por ano, para a compensação das emissões globais de gases de efeito estufa gerados por fontes antropogênicas (Minasny et al., 2017).

Além disso, o Brasil está alinhado com a agenda internacional no uso sustentável dos recursos naturais, de acordo com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (*Sustainable Development Goals*) estabelecidos, propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU) na Conferência sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, sendo a matéria orgânica dos solos um elemento chave para alcançar os ODS (Madari et al., 2021). O manejo adequado possibilita que o solo forneça os serviços ecossistêmicos, que incluem a produção de alimentos, fibras e energia, regulação do clima, regulação de inundações, melhoria da qualidade do ar e da água, e reservatório para a biodiversidade, bem como aumentar a resiliência do ecossistema diante das mudanças climáticas (Bouma, 2014; Lal, 2016). Os indicadores de saúde do solo desempenham um papel importante na sustentabilidade da agricultura e são relevantes para alcançar os ODS.

O principal objetivo do SIPA é aumentar a produtividade e a eficiência do uso da terra (Nair, 2013). Os SIPA representam uma oportunidade promissora no conjunto de possíveis estratégias de intensificação agrícola para o Brasil, pois têm o potencial de recuperar vastas

áreas de pastagens degradadas e ao mesmo tempo mitigar as emissões de gases de efeito estufa (Cortner et al., 2019; Sá et al., 2017). Este uso mais eficiente da terra, combinando as boas práticas de manejo das pastagens e dos animais podem aumentar a produção de produtos pecuários por unidade de pasto em até 2,5 vezes em relação aos sistemas convencionais (Martha Jr., 2012). Além disso, Cohn et al. (2014) examinaram as políticas de incentivo à intensificação da pecuária no Brasil, e concluíram que esta é uma alternativa viável de reduzir as emissões globais de Gases de Efeito Estufa (GEE) ao poupar terras do desmatamento.

Além do aumento da eficiência do uso da terra e da sustentabilidade agrícola, os sistemas integrados têm grande potencial de sequestro de C atmosférico (Sá et al., 2017; Bieluczyk et al., 2020; Freitas et al., 2020; Sarto et al., 2020b). Nair et al. (2010) relataram que as estimativas de estoques de C do solo variam entre 30 a 300 Mg C ha⁻¹ na profundidade de 1m no solo, e as variações eram devido às diferenças entre sistemas, regiões ecológicas e tipos de solo. Batjes (2005) avaliou os estoques de C em diferentes classes de solos do Brasil e encontrou variações de 42 Mg C ha⁻¹ em Neossolos Quartzarênicos à 137 Mg C ha⁻¹ em Gleissolos, já nas classes de maior representatividade do país, como os Latossolos e os Argissolos, os estoques eram, respectivamente de 96 e 79 Mg C ha⁻¹ até a profundidade de 1,0 m. Os SIPA que inserem a árvore no arranjo tendem a sequestrar maiores quantidades de C do que os sistemas puramente agrícolas (Nair et al., 2010; Sarto et al., 2020b). Os resultados de Freitas et al. (2020) e Bieluczyk et al. (2020) confirmaram as diferenças significativas nos estoques de carbono do solo, após a conversão da pastagem para sistemas agroflorestais de produção mais intensiva.

3 . CONSIDERAÇÕES FINAIS

A agricultura brasileira pode produzir muito mais alimentos, fibras e energias renováveis, sem derrubar uma única árvore de floresta nativa, e ainda recuperar vastas áreas de pastagens degradadas. Os alimentos produzidos por esta agricultura podem ser saudáveis e diversos, gerando dietas saudáveis para a população, frutos de um solo saudável. O produtor rural pode produzir mais alimentos em uma mesma área, utilizar melhor os recursos naturais e ainda lucrar mais. Esta mesma agricultura pode ser dreno de C atmosférico, contribuindo para que o Brasil equilibre o balanço entre emissões de GEE e sequestro de C, e assim, cumpra com os acordos internacionais sobre o clima. Esse cenário não é utopia, e sim a descrição dos SIPA e sua capacidade em ser o pilar para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável.

Neste capítulo, foi demonstrado que os SIPA se caracterizam pela irradiação dos seus benefícios para os agricultores, meio ambiente e toda a sociedade. Mas para que esses ganhos ocorram não se trata simplesmente de incluir componentes no tempo ou no espaço e

os intercalar, pois a integração entre culturas anuais, pastagem e/ou árvores não é simples, ordinária ou baseada em “tentativa e erro”. Para se obter sucesso, nestes sistemas, uma série de premissas deve ser seguida, a começar pelos três princípios globais da agricultura conservacionista: cobertura permanente do solo, rotação de culturas e revolvimento mínimo na linha de plantio. Ao longo do tempo, o solo deve ter a sua qualidade e saúde acompanhada por indicadores físicos, químicos e biológicos. A intensidade de pastejo moderada é a que melhor favorece a ciclagem de nutrientes, e compõe a melhor “relação custo-benefício” frente aos indicadores de qualidade do solo. Os componentes do sistema não são apenas alvo de produtividade, mas sim protagonistas biológicos ativos do manejo, e quando alocados de forma estratégica são nossos aliados para melhorar a qualidade e a saúde do solo.

A intensificação e aumento da biodiversidade por meio dos SIPA são estratégias que, além de trazer um modelo mais economicamente sustentável de agricultura, aumentam diversidade e interações sinérgicas (ou complementares) no ambiente edáfico. Esta sinergia é dependente das condições edafoclimáticas, das espécies cultivadas (agrícolas, pastoris e arbóreas), da intensidade de pastejo, dos arranjos espaciais e temporais, e da partição dos recursos (água, luz e nutrientes). Assim, a integração resulta em mudanças nos processos abaixo e acima da superfície do solo. A dinâmica resultante já tem mudado alguns paradigmas no manejo do solo, no qual as interações devem ser levadas em consideração para a adoção de práticas inovadoras, como é o caso da “adubação de sistemas”. Ainda há um longo caminho a ser percorrido para aperfeiçoar o manejo do solo, de acordo com as inúmeras possibilidades de arranjos em SIPA. Porém, há a certeza de que esses sistemas futuramente contribuirão de forma crescente na otimização do uso de recursos, na produtividade agropecuária e na eficiência do uso da terra.

REFERÊNCIAS

Almeida RG, Oliveira PPA, Macedo MCM, Pezzopane JRM. Recuperação de pastagens degradadas e impactos da pecuária na emissão de gases de efeito estufa. In: Anais do Simpósio Internacional de Melhoramento de forrageiras [CD-ROM]; Bonito, MS, Brasil. Embrapa Gado de Corte, Campo Grande. 2011. p. 384-400.

Alvarenga RC, Gontijo Neto MM, Ramalho JH, Garcia JC, Viana MCM, Castro ADN, Macedo MCM. Sistema de Integração Lavoura-Pecuária: O modelo implantado na Embrapa Milho e Sorgo. 1. ed. Sete Lagoas: Embrapa. 2007. 9p. (Circular Técnica 93).

Alves LA, Denardin LGO, Martins AP, Anghinoni I, Carvalho PCF, Tiecher T. Soil acidification and P, K, Ca and Mg budget as affected by sheep grazing and crop rotation in a long-term integrated crop-livestock system in southern Brazil. *Geoderma*. 2019; 351: 197-208. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.04.036>.

Andrade CMS, Garcia R, Couto L, Pereira OG. Transmissão de luz em sistemas silvipastoris com eucalipto. *Revista Árvore*. 2002; 26: 19-23. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/158611/1/17385.pdf>.

Andrade FH, Sadras VO, Vega CRC, Echarte, L. Physiological Determinants of Crop Growth and Yield in Maize, Sunflower and Soybean. *J. Crop Improv.* 2005; 14: 51-101. https://doi.org/10.1300/j411v14n01_05

Anghinoni I, Carvalho PCF, Costa SEVG. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro. In: Araujo AP, Alves BJR, editores. *Tópicos em Ciência do Solo Volume VIII*. 1 ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2013; 3: 25-380.

Anghinoni I, Martins AP, Assmann JM, Costa SE, Carvalho PC. Ciclagem de nutrientes em integração lavoura-pecuária. In: *Anais do III Encontro Integração Lavoura-Pecuária no Sul do Brasil*. [CD-ROM]; 2011; Pato Branco, Brasil. Pato Branco: Synergismus scyentifica UTFPR; 2011. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/gpep/documents/artigos/2011/Ciclagem%20de%20nutrientes%20em%20iLP.pdf>.

Anghinoni I, Carvalho PCF, Martins AP, Assmann JM, Arnuti F, Borin JB, Cecagno D, Denardin LGO, Tiecher A, Moraes, A. Ciclagem de nutrientes. In: Jamhour J, Assmann TS, organizadores. *Palestras: intensificação com sustentabilidade*. 1ª. ed. Cascavel: UTFPR, Campus Pato Branco. 2017. p. 53-66.

Araújo-Júnior CF, Bonetti JA. Atributos Físicos do Solo em Sistemas Integrados de produção Agropecuária. In: Souza ED, Silva FD, Assmann TS, Carneiro MAC, Carvalho PCF, Paulino, HB (Ed.). *Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil*. Tubarão, Copiart. 2018. p. 91-106.

Assmann JM, Anghinoni I, Martins AP, Costa SEVG de A, Cecagno D, Carlos FS, Carvalho PCF. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop-livestock system under no-tillage in southern Brazil. *Agric Ecosyst Environ.* 2014; 190: 52-59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.12.003>

Assmann JM, Anghinoni I, Martins AP, Costa SEVGA, Kunrath TR, Bayer C, Carvalho PCF, Franzluebbbers AJ. Carbon and nitrogen cycling in an integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities. *Pesqui Agropecu Bras.* 2015; 50: 967-978. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2015001000013>

Assmann JM, Martins AP, Anghinoni I, Denardin LG de O, Nichel GH, Costa SEVG de A, Silva RAP, Balerini F, Carvalho PCF, Franzluebbbers AJ. Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities in subtropics. *Nutr Cycl Agroecosystems.* 2017c; 108(1): 21-33. <http://dx.doi.org/10.1007/s10705-016-9818-6>

Assmann JM, Martins AP, Anghinoni I. Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities in subtropics. *Nutr Cycl Agroecosys.* 2017a; 95:1-13. <http://dx.doi.org/10.1007/s10705-016-9818-6>

Assmann TS, Ronzelli JRP, Moraes A, Assmann AL, Koehler HS, Sandini I. Rendimento de milho em área de integração lavoura-pecuária sob o sistema de plantio direto, em presença e ausência de trevo branco, pastejo e nitrogênio. *Rev Bras Ciênc Solo.* 2003; 27: 675-683. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000400012>

Assmann TS, Soares AB, Assmann AL, Huf FL, Lima RC. Adubação de sistemas em integração lavoura-pecuária. In: Jamhour J, Assmann TS (Org.). *Palestras: intensificação com sustentabilidade*. 1. ed. Cascavel: UTFPR Campus Pato Branco. 2017b. p. 67-84.

Assmann AL, Pelissari A, Moraes A, Assmann TS. Produção de Gado de Corte e Acúmulo de Matéria Seca em Sistema de Integração Lavoura-Pecuária em Presença e Ausência de Trevo Branco e Nitrogênio. *Rev Bras Zoot.* 2004; 33: 37-44. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982004000100006>

Assmann TS, Ronzelli JRP, Moraes A, Assmann AL, Koehler HS, Sandini I. Rendimento de milho em área de integração lavoura-pecuária sob o sistema de plantio direto, em presença e ausência de trevo branco, pastejo e nitrogênio. *Rev Bras Cienc Solo.* 2003; 27: 675-683. <https://doi.org/10.1590/S0100-0683200300040001>.

Balbino CL, Vilela L, Cordeiro LAM, Oliveira P, Pulrolnik K, Kluthcouski J, Silva JLS. Curso de Capacitação do Programa ABC - Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) Região Sul. Brasília; Embrapa: 2012. 83p.

Balbino LC, Barcellos A de O, Stone LF. Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). 1. ed. Brasília: Embrapa; 2011.

Baptistella JL, Andrade SAL, Favarin JL, Mazzafera P. Urochloa in Tropical Agroecosystems. *Front Sustain Food Syst.* 2020; 4: 1-17. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00119>

Barro RS, Saibro JC, Medeiros RB, Silva JL, Varella AC. Rendimento de forragem e valor nutritivo de gramíneas anuais de estação fria submetidas a sombreamento por *Pinus elliottii* e ao sol pleno. *Rev Bras Zoot.* 2008; 37: 1721-1727. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982008001000002>

Batjes NH. Organic carbon stocks in the soils of Brazil. *Soil Use Manag.* 2005; 21(1): 22-24. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2005.tb00102.x>

Batjes NH. Technologically achievable soil organic carbon sequestration in world croplands and grasslands. *Land Degrad Dev.* 2019; 30: 25–32. <https://doi.org/10.1002/ldr.32>

Bernardi ACC, Machado PLO, Freitas PL, Coelho MR, Leandro WM, Júnior JPO, Oliveira RP, Santos HG, Madari BE, Carvalho MCS. Correção do solo e adubação no sistema de plantio direto nos cerrados. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2003. 22p. (Documento 46).

Bernardi ACC, Esteves SN, Pezzopane JRM, Alves TC, Berndt A, Pedroso AF, Rodrigues PHM, Martin Neto L, Oliveira PPA. Estoques de carbono no solo em sistemas integrados no bioma Mata Atlântica. In: Sotta ED, Sampaio FG, Costa MSN (Ed.). Coletânea de fatores de emissão e remoção de gases de efeito estufa da pecuária brasileira. Brasília: MAPA-SENAR. 2020. p.104-105.

Bieluczyk W, Piccolo MC, Pereira, MG, Moraes MT, Soltangheisi A, Bernardi ACC, Pezzopane JRM, Oliveira PPA, Moreira MZ, Camargo PB, Dias CT, Batista I, Cherubin MR. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. *Geoderma.* 2020; 371: 114368. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114368>

Bieluczyk W, Piccolo MC, Pereira, MG, Lambais GR, Moraes MT, Soltangheisi A, Bernardi ACC, Pezzopane JRM, Bosi C, Cherubin MR. Eucalyptus tree influence on spatial and temporal dynamics of fine-root growth in an integrated crop-livestock-forestry system in southeastern Brazil. *Rhizosphere.* 2021; 19: 100415. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100415>

Bieluczyk W. Crescimento e decomposição de raízes finas e qualidade do solo sob sistemas integrados de agricultura, pecuária e floresta (São Carlos, SP) [tese]. Piracicaba: Universidade de São Paulo. 2018. <https://doi.org/10.11606/T.64.2018.tde-24102018-151618>

Bonaudo T, Bendahan AB, Sabatier R, Ryschawy J, Bellon S, Leger F, Magda D, Tichit M. Agroecological principles for the redesign of integrated crop-livestock systems. *Eur J Agron.* 2014; 57: 43-51. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.010>

Bonetti JA, Anghinoni I, Gubiani PI, Cegagno D, Moraes MT. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol. *Soil Tillage Res.* 2019; 186: 280-291. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.003>

Bonetti JA, Paulino HB, de Souza ED, Carneiro MAC, da Silva GN. Influência do sistema integrado de produção agropecuária no solo e na produtividade de soja e braquiária. *Pesqui Agropecu Trop.* 2015; 45(1):104-112. <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v45i29625>

Bonetti JA. Atributos físicos, hídricos e biológicos de solo e de planta em sistemas integrados de produção agropecuária [tese]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2017.

Bonetti JA, Anghinoni I, Moraes MT, Fink JR. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. *Soil Tillage Res.* 2017; 174:104-112. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.06.008>

Borges AL, Accioly AMA. Amostragem de Solo para Recomendação de Calagem e Adubação. 1. ed. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical. 2007. 4p. (Comunicado Técnico 122).

Bouma J. Soil science contributions towards Sustainable Development Goals and their implementation: Linking soil functions with ecosystem services. *J Plant Nutr Soil Sci.* 2014; 177: 111-120. <https://doi.org/10.1002/jpln.201300646>

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) / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério do Desenvolvimento Agrário, coordenação da Casa Civil da Presidência da República. – Brasília: MAPA/ACS. 2012. 173 p.

Bungenstab DJ, Almeida RG. Integrated crop-livestock-forestry systems: a Brazilian experience for sustainable farming. 1. ed. Brasília: Embrapa. 2014.

Cardoso EJBN, Andreote FD. Microbiologia do Solo. 2. ed. Piracicaba: ESALQ. 2016.

Carmona FDC, Gustavo L, Denardin DO, Martins AP, Anghinoni I, Ibanor, Carvalho PCF. Sistemas integrados de produção agropecuária em terras baixas: a integração lavoura-pecuária como o caminho da intensificação sustentável da lavoura arrozeira. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS. 2018. p.1-164.

Carmona FC, Anguinoni I, Mezzari CP, Martins AP, Carvalho PCF. Effectiveness of Current Fertilizer Recommendations for Irrigated Rice in Integrated Crop-Livestock Systems. *Rev Bras Cienc Solo.* 2016; 40: e0140798. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc2014079>

Carter MR, Gregorich EG. Soil Sampling and Methods of Analysis. 2. ed. Boca Raton: CRC; 2007.

Carvalho PCF, Barro RS, Barth Neto A, et al. Integrating the pastoral component in agricultural systems. *Rev Bras Zootec.* 2018; 47: e20170001. <https://doi.org/10.1590/rbz4720170001>

Carvalho PCF, Moraes AD, Pontes LDS, Anghinoni I, Sulc RM, Batello C. Definições e terminologias para sistema integrado de produção agropecuária. *Rev Cien Agron.* 2014; 45(5): 1040-1046.

Carvalho PCF, Anghinoni I, Moraes A, Souza ED, Sulc RM, Lang CR, Flores JPC, Lopes MLT, Silva JLS, Conte O, Wesp CL, Levien R, Fontaneli RS, Bayer C. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. *Nutr Cycl Agroecosys.* 2010; 88: 259-273. doi: 10.1007/s10705-010-9360-x

Carvalho FP, Melo CAD, Machado MS, Dias DCFS, Alvarenga EM. The allelopathic effect of eucalyptus leaf extract on grass forage seed. *Planta Daninha.* 2015; 33: 193–201. <https://doi.org/10.1590/0100-83582015000200004>

Carvalho MM, Xavier DF. Sistemas silvipastoris para recuperação e desenvolvimento de pastagens. In: Aquino AM, Assis RL (Ed.). *Agroecologia: princípios e técnicas para uma agricultura orgânica sustentável*. 1. Ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. 2005. p.497-518.

Carvalho P, Domiciano LF, Mombach MA, Nascimento HLB, Cabral LS, Sollenberger LE, Pereira DH, Pedreira BC. Forage and animal production on palisadegrass pastures growing in monoculture or as a component of integrated crop–livestock–forestry systems. *Grass Forage Sci.* 2019; 74: 650-660. <https://doi.org/10.1111/gfs.12448>

Cassol EA, Denardin JE, Kochhann RA. Sistema Plantio Direto: evolução e implicações sobre a conservação do solo e da água. In: Ceretta CA, Silva LS, Reichert JM (Ed.). *Tópicos em Ciência do Solo*. Volume 5. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2007. p 333–369.

Castro Dias MB, Costa CAP, Severiano EC, Bilego UO, Furtini Neto AE, Almeida DP, Brand SC, Vilela L. Brachiaria and Panicum maximum in an integrated crop-livestock system and a second-crop maize system in succession with soybean. *The Journ Agric Sci.* 2020; 158: 349–349. <https://doi.org/10.1017/S0021859620000659>

Chen H, Liu J, Li D, Xiao K, Wang K. Controls on soil arylsulfatase activity at a regional scale. *Eur J Soil Biol.* 2019; 90: 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2018.11.001>

Cherubin MR, Karlen DL, Franco ALC, Cerri CEP, Tormena CA, Cerri CA. A Soil Management Assessment Framework (SMAF) Evaluation of Brazilian Sugarcane Expansion on Soil Quality. *Soil Sci Soc Am J.* 2016; 80: 215-226. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.09.0328>

Cherubin MR, Tormena CA, Karlen DL. Soil Quality Evaluation Using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian Oxisols with Contrasting Texture. *Rev Bras Ciência do Solo.* 2017; 41: 1–18. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160148>

Cohn AS, Mosnier A, Havlík P, Valin H, Herrero M, Schmid E, O'Hare M, Obersteiner M. Cattle ranching intensification in Brazil can reduce global greenhouse gas emissions by sparing land from deforestation. *Proc Natl Acad Sci U.S.A.* 2014; 111: 7236–7241. <https://doi.org/10.1073/pnas.1307163111>

Cortner O, Garrett RD, Valentim JF, Ferreira J, Niles MT, Reis J, Gil J. Perceptions of integrated crop-livestock systems for sustainable intensification in the Brazilian Amazon. *Land use policy.* 2019; 82: 841–853. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2019.01.006>

Costa SEVGA, Souza ED, Anguinoni I, Carvalho PCF, Martins AP, Kunrath TR, Cegagno D, Balerini F. Impact of an integrated no-till crop-livestock system on phosphorus distribution, availability and stock. *Agric Ecosyst Environ.* 2014; 190: 43-51. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.12.001>

CQFS-RS/SC – Comissão de Química e Fertilidade do Solo dos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Manual de Calagem e Adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 11. ed. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul. 2016.

Cruz JC, Alvarenga RC, Viana JHM, Pereira-Filho IA, Filho MR de A, Santana DP. Sistema de Plantio Direto de Milho [internet]. 2005 Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_72_59200523355.html#.

Damian JM, Silva Matos E, Pedreira BC, Carvalho PCF, Souza AJ, Andreote FD, Premazzi LM, Cerri CEP. Pastureland intensification and diversification in Brazil mediate soil bacterial community structure changes and soil C accumulation. *Appl Soil Ecol.* 2021; 160: 103858, <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103858>

Davis AS, Hill JD, Chase CA, Johanns AM, Liebman M. Increasing Cropping System Diversity Balances Productivity, Profitability and Environmental Health. *PLoS One.* 2012; 7: e47149. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047149>

Denardin JE, Faganelo A, Santi A. Falhas na implementação do sistema plantio direto: Problemas têm acontecido e são resultantes do descaso com a adoção plena do complexo de processos tecnológicos que compõem o sistema de plantio direto. *Rev A Lavoura.* 2009; 112(671): 20-22.

Denardin LGO, Martins AP, Bastos LM, Ciampitti IA, Anghinoni I, Moojen FG, Carvalho PCF, Huang M, Chabbi A. Soybean yield does not rely on mineral fertilizer in rotation with flooded rice under a no-till integrated crop-livestock system. *Agronomy.* 2020b; 10(9): 1371. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091371>

Denardin LGO, Martins AP, Carmona FC, Veloso MG, Carmona GI, Carvalho PCF, Anghinoni I. Integrated crop-livestock systems in paddy fields: New strategies for flooded rice nutrition. *Agron J.* 2020a; 112: 2219–2229. doi:10.1002/agj2.20148

Deng SP, Tabatabai MA. Effect of tillage and residue management on enzyme activities in soils: III. Phosphatases and arylsulfatase. *Biol Fertil Soils.* 1997; 24: 141-146. <https://doi.org/10.1007/s003740050222>

Dias-filho MB, Ferreira JN. O Pastejo e a Biodiversidade da Pastagem. 1. ed. Belém: Embrapa Amazônia Oriental. 2009. 46p.

Didoné EJ, Minella JPG, Reichert JM, Merten GH, Dalbianco L, de Barros CAP, Ramon R. 2014. Impact of no-tillage agricultural systems on sediment yield in two large catchments in Southern Brazil. *J Soils Sediments.* 2014;14(7): 1287–1297. doi:10.1007/s11368-013-0844-6

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Intergovernmental Technical Panel on Soils. Status of the World's Soil Resources [internet]. Intergovernmental Technical Panel on Soils; 2015. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. The future of food and agriculture [internet]. Trends and Challenges; 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO. Principles of no-till [internet]. 2014. Disponível em: <http://www.fao.org/conservation-agriculture/en/>. Acesso em: 05 jun. 2021.

Farias GD, Dubeux JCB, Savian JV, Duarte LP, Martins AP, Tiecher T, Alves LA, Carvalho PCF, Bremm C. Integrated crop-livestock system with system fertilization approach improves food production and resource-use efficiency in agricultural lands. *Agron Sustain Dev*. 2020; 40(6): 1-9. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00643-2>

Fisher MJ, Rao IM, Ayarza MA, Lascano CE, Sanz JI, Thomas RJ, Vera RR. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature*. 1994; 371: 236–238. <https://doi.org/10.1038/371236a0>

Ford MM. Expanding agroforestry in Minnesota, USA: assessing the potential for silvopasture as an alternative to passive woodland grazing [dissertação]. St Paul: University of Minnesota; 2016.

Franco AJ, Silva APV, Souza ABS, Oliveira RF, Batista ER, Souza ED, Silva AO, Carneiro, MAC. Plant diversity in integrated crop-livestock systems increases the soil enzymatic activity in the short term. *Pesqui Agropecu Trop*. 2020; 50: 1–11. <https://doi.org/10.1590/1983-40632020V5064026>

Freire LR, Balieiro FC, Zonta E, Anjos LHC, Pereira MG, Lima E et al. Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro. Embrapa; Seropédica Editora: Universidade Rural. 2017. 430p.

Freitas IC, Ribeiro JM, Araújo NCA, Santos MV, Sampaio RA, Fernandes LA, Azevedo AM, Feigl BJ, Cerri CEP, Frazão LA. Agrosilvopastoral Systems and Well-Managed Pastures Increase Soil Carbon Stocks in the Brazilian Cerrado. *Rangel Ecol Manag*. 2020; 73: 776–785. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2020.08.001>

Galiana A, Balle P, N’Gessan Kanga A, Domenash AM. Nitrogen fixation estimated by the ^{15}N natural abundance method in *Acacia mangium* Willd. inoculated with *Bradyrhizobium* sp. and grown in silvicultural conditions. *Soil Biol Biochem*. 2002; 34:251–262. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00179-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00179-1)

Gao J, Liu Z, Zhao B, Dong S, Liu P, Zhang J. Shade stress decreased maize grain yield, dry matter, and nitrogen accumulation. *Agron. J*. 2020; 112: 2768–2776. <https://doi.org/10.1002/agj2.20140>

Garrett RD, Koh I, Lambin EF, Waroux YP, Kastens JH, Brown JC. Intensification in agriculture-forest frontiers: Land use responses to development and conservation policies in Brazil. *Glob Environ Chang*. 2018; 53: 233–243. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.09.011>

Garrett RD, Ryschawy J, Bell LW, Cortner O, Ferreira J, Garik AVN, Gil JDB, Klerkx L, Moraine M, Peterson CA, Reis JC, Valentim JF. Drivers of decoupling and recoupling of crop and livestock systems at farm and territorial scales. *Ecol Soc*. 2020; 25: 1-24. <https://doi.org/10.5751/ES-11412-250124>

Gillespie AR, Jose S, Mengel DB, Hoover WL, Pope PE, Seifert JR, Biehle DJ, Stall T, Benjamin TJ. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the mid-western USA: 1. Production physiology. *Agroforestry Systems*. 2000; 48: 25-40. <https://doi.org/10.1023/A:1006285205553>

Giro A, Pezzopane JRM, Barioni Junior W, Pedroso AF, Lemes AP, Botta D, Romanello N, Barreto AN, Garcia AR. Behavior and body surface temperature of beef cattle in integrated crop-livestock systems with or without tree shading. *Sci Total Environ.* 2019; 684: 587–596. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.377>

Glatzle S, Stuerz S, Giese M, Pereira, M, Almeida RG, Bungestab DJ, Macedo MCM, Asch F. Seasonal Dynamics of Soil Moisture in an Integrated-Crop-Livestock-Forestry System in Central-West Brazil. *Agriculture.* 2021; 11(3): 245. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030245>

Guimarães-Filho C, Soares JGG. Fruti-Ovinocultura: Limitações e possibilidades de consorciar ovinos com fruteiras. In: *Anais do I Simpósio Internacional sobre o Agronegócio da Caprinocultura Leiteira; Simpósio Internacional sobre Caprinos e Ovinos de Corte, 2, 2003, João Pessoa, João Pessoa-EMEP. 2003. p.233-242. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/152177>*

Haynes RJ, Williams PH. 1993. Nutrient Cycling and soil fertility in grazed pasture ecosystem Part II. *Adv Agron.* 49:119–199.

Hendrickson JR, Hanson JD, Tanaka DL, Sassenrath G. Principles of integrated agricultural systems: Introduction to processes and definition. *Renew Agric Food Syst.* 2008; 23: 265–271. <https://doi.org/10.1017/S1742170507001718>

Hopkins A, Holz B. Grassland for agriculture and conservation: production, quality and multi-functionality. *Agronomy Research.* 2006; 4: 3-20. Disponível em: <https://agronomy.emu.ee/category/volume-04-2006/number-1-volume-4-2006/>

Houghton RA, Hall F, Goetz SJ. Importance of biomass in the global carbon cycle. *J Geophys Res Biogeosci.* 2009; 114: 1-13. <https://doi.org/10.1029/2009JG000935>

Hudson, NW. *Soil conservation.* 3 ed. Ithaca: Cornell University Press. 1995.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report.* 2015. p.811-922. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9781107415416.017>

Juerges N, Hansjurgens B. Soil governance in the transition towards a sustainable bioeconomy. *J Clean Prod.* 2018;170: 1628-1639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.143>

Karlen DL, Ditzler CA, Andrews SS. Soil quality: Why and how? *Geoderma.* 2003; 114: 145–156. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00039-9)

Karlen DL, Mausbach MJ, Doran JW, Cline RG, Harris RF, Schuman GE. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Sci Soc Am J.* 1997; 61: 4. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>

Khlifa R, Paquette A, Messier C, Reich PB, Munson AD. Do temperate tree species diversity and identity influence soil microbial community function and composition? *Ecol Evol.* 2017; 7: 7965–7974. <https://doi.org/10.1002/ece3.3313>

Kunrath TR, Nunes PAA, Souza Filho W, Cadenazzi M, Bremm C, Martins AP, Carvalho PCF. Sward height determines pasture production and animal performance in a long-term soybean-beef cattle integrated system. *Agric Syst.* 2020; 177: 102716. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102716>

Lal, R. Soil health and carbon management. *Food Energy Secur.* 2016; 5: 212-222. <https://doi.org/10.1002/fes3.96>

Lançanova JAC, Restle J, Santos GL. Produção e qualidade do capim papuã (*Brachiaria plantaginea*) sob efeito de frequências de corte e nitrogênio. *Cienc Rural.* 1988; 18: 343–354.

Laroça JVS, Souza JMA, Pires GC, Pires GJC, Pacheco LP, Santos FD, Wruck FJ, Carneiro MAC, Souza ED. Soil quality and soybean productivity in Crop-Livestock Integration Systems in no-tillage. *Pesqui Agropecu Bras.* 2018; 53: 1248-1258. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X20180011000007>

Latawiec AE, Strassburg BBN, Junqueira AB, Araujo E, Luiz LF, Pinto HAN, Castro A, Rangel M, Malaguti GA, Rodrigues AF, et al. 2019. Biochar amendment improves degraded pasturelands in Brazil: environmental and cost-benefit analysis. *Sci Rep.* 2019; 9(1): 1–12. doi:10.1038/s41598-019-47647-x

Le Quéré C. et al. Global Carbon Budget 2016. *Earth System Science Data.* 2016; 8(2): 605-649. <https://doi.org/10.5194/essd-8-605-2016>

Lemaire G. Ecophysiology of grasslands: dynamic aspects of forage plant population in grazed swards (online). In: *International Grassland Congress.* São Pedro. 2001. p.29–37. Disponível em: <https://userweb.weihenstephan.de/lattanzi/Lit/Lemaire%202001.pdf>.

Lemaire G, Franzluebbbers A, Carvalho PC de F, Dedieu B. Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agric Ecosyst Environ.* 2014; 190: 4-8. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>

Liu C, Song Y, Dong X, Wang X, Ma X, Zhao G, Zang S. Soil enzyme activities and their relationship with soil C, N and P in Peatlands from different types of permafrost regions, Northeast China. *Front Environ Sci.* 2021; 9: 670769. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.670769>

Lopes AAC, Sousa DMG, Chaer GM, Reis Junior FB, Goedert WJ, Mendes IC. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. *Soil Sci Soc Am J.* 2013; 77: 461 – 472. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0191>

López-Mársico L, Altesor A, Oyarzabal M, Baldassini P, Paruelo JM. Grazing increases below-ground biomass and net primary production in a temperate grassland. *Plant Soil.* 2015; 392: 155–162. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2452-2>

Louca S, Polz MF, Mazel F, Albright MBN, Huber JA, O'Connor MI, Ackermann M, Hahn AS, Srivastava DS, Crowe SA, Doebeli MD, Parfrey LW. Function and functional redundancy in microbial systems. *Nat Ecol Evol.* 2018; 2: 936–943. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0519-1>

Macedo MCM. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. *Rev Bras Zoot.* 2009; 38: 133-146.

Madari BE, Cuadra SV, Oliveira PPA, Higa RCV, Ramos NP, Andrade CA, Kemenes A, Gondim RS. The role of agriculture in mitigating greenhouse gas emissions. In: Cuadra SV, Heinemann AB, Barioni LG, Mozzer GB, Bergier I. (Ed.). *Climate action: contributions of Embrapa*. Brasília: Embrapa. 2020. p. 57-65. (Sustainable development goals, 13).

MAFF. *Fertiliser recommendations for agricultural and horticultural crops (RB 209)*. 7 ed. Londres: MAFF Publications. 2000.

Makoi JHJR, Ndakidemi PA. Selected soil enzymes: Examples of their potential roles in the ecosystem. *Afr J Biotechnol*. 2008; 7(3):181–191. <https://www.academicjournals.org/AJB>.

Martha GB, Alves E, Contini E. Land-saving approaches and beef production growth in Brazil. *Agric Syst*. 2012; 110: 173-177. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.03.001>

Martin G, Moraine M, Ryschawy J, Magne MA, Asai M, Sarthou JP, Duru M, Therond O. Crop–livestock integration beyond the farm level: a review. *Agron Sustain Dev*. 2016; 36: 53. <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-016-0390-x>

Martins AP, Denardin LG de O, Tiecher T, Borin JBM, Schaidhauer W, Anghinoni I, Carvalho PC de F, Kumar S. Nine-year impact of grazing management on soil acidity and aluminum speciation and fractionation in a long-term no-till integrated crop-livestock system in the subtropics. *Geoderma*. 2020; 359: 113986. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113986>

Martins AP, Kunrath TR, Anghinoni I, Carvalho PCF. *Integração soja-bovinos de corte no Sul do Brasil: 15 anos de resultados*. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2015.

Martins AP, Gomes MV, Denardin LGO, Freitas TFS, Anguinoni I, Bayer C, Tiecher T, Kunrath, TR, Carvalho PCF. Melhorias ambientais proporcionadas pelos sistemas integrados de produção agropecuária. In: Souza ED, Silva FD, Assmann TS, Carneiro MAC, Carvalho PCF, Paulino HB, (Ed.). *Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil*. 1ed. Tubarão: Copiart. 2018. p.45-70.

Martins AP, Costa SEVGAC, Anguinoni I, Kunrath TR, Balerini F, Cecagno D, Carvalho PCF. Soil acidification and basic cation use efficiency in an integrated no-till crop-livestock system under different grazing intensities. *Agric Ecosyst Environ*. 2014; 195: 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.05.012>

Martins JD, Restle J, Barreto IL. Produção animal em capim papuã (*Brachiaria plantaginea*) submetido a níveis de nitrogênio. *Cienc Rural*. 2000; 30: 887-892. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782000000500025>

Mathews BW, Sollenberger LE, Tritschler II JP. Grazing systems and spatial distribution of nutrients in pastures - soil considerations. In: Joost RE, Roberts CA, editors. *Nutrient cycling in forage systems*. Columbia: University of Missouri; 1996. p.213-229.

Meiss H, Mediene S, Walhardt R, Caneill J, Munier-Jolain N. Contrasting weed species composition in perennial alfalfas and six annual crops: implications for integrated weed management. *Agron Sustain Dev*. 2010; 30: 657-666. <https://doi.org/10.1051/agro/2009043>

Melloto AM, Laura VA, Bungenstab DJ, Ferreira AD. Espécies florestais em sistemas de produção em integração. In: Bungenstab DJ (Ed.). *Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: a produção sustentável*. 2. ed. Brasília: Embrapa; 2012. p.95-120.

- Mendes IC, Chaer GM, Sousa DMG, Reis Júnior FB, Dantas OD, Oliveira MIL, Lopes AAC, Souza LM. Bioanálise de solo: a mais nova aliada para a sustentabilidade agrícola. 1. ed. Piracicaba: NPCT. 2020. 11p. (Informações agronômicas NPCT nº 8).
- Mendes IC, Souza DMG, Reis Junior FB, Lopes AAC. Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo. 1. ed. Planaltina: Embrapa. 2018. 23p. (Circular Técnica 38).
- Mendes MMS, Lacerda CF, Cavalcante ACR, Fernandes FEP, Oliveira TS. Desenvolvimento do milho sob influência de árvores de pau-branco em sistema agrossilvipastoril. *Pesqui Agropecu Bras.* 2013; 48: 1342-1350. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013001000005>
- Minasny B, et al. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma.* 2017; 292: 59-86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Montanarella L. Agricultural policy: Govern our soils. *Nature.* 2015; 528: 32-33. <https://doi.org/10.1038/528032a>
- Montgomery DR. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2007; 104: 13268-13272. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104>
- Moraes A, Carvalho PCF, Crusciol CAC, Lang CR, Pariz CM, Deiss L, Sulc RM. Integrated Crop-Livestock Systems as a Solution Facing the Destruction of Pampa and Cerrado Biomes in South America by Intensive Monoculture Systems. In: Lemaire G, Carvalho PCF, Kronberg S, Recous SBT, editors. *Agroecosystem Diversity.* Cambridge, Academic Press: 2019. p. 257–273. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811050-8.00016-9>
- Moraes A, Carvalho PCF, Anghinoni I, Lustosa SBC, Costa SEVGA, Kunrath TR. Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. *Eur J Agron.* 2014; 57: 4–9. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.10.004>
- Moraes A, Carvalho PCF, Balbino L, Souza ED. Sistemas de integração lavoura-pecuária. In: Souza ED, Silva FD, Assmann TS, Carneiro MAC, Carvalho PCF, Paulino, HB,(Ed.). *Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil.* Tubarão, Copiart. 2018. p. 205-219.
- Moreira GM, Neves JCL, Magalhães CAS, Farias Neto, AL, Sauer G, Silva JFV, Fernandes, RBA. Soil chemical attributes in response to tree distance and sun-exposed faces after the implantation of an integrated crop-livestock-forestry system. *Rev Arvore.* 2018; 42: 1–9. <https://doi.org/10.1590/1806-90882018000400005>
- Mottet A, Haan C, Falcucci A, Tempio G, Opio C, Gerber P. Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Glob Food Sec.* 2017; 14: 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.001>
- Nair PKR. Agroforestry: trees in support of sustainable agriculture. In: Elias SA, Marshall S, Goldstein M, editors. *Reference module in earth systems and environmental sciences.* Londres: Elsevier. 2013. p.33–44. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.05088-0>
- Nair PKR, Nair VD, Kumar BM, Showalter JM. Carbon sequestration in agroforestry systems. *Adv Agron.* 2010; 108: 237–307. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3)

Nicodemo MLF, Castiglioni PP, Pezzopane JRM, Tholon P, Carpanezi AA. Reducing Competition in Agroforestry by Pruning Native Trees. *Rev Árvore*. 2016; 40: 509–518. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000300014>

Nicodemo MLF, Silva PS, Thiago LRLS, Gontijo Neto MM, Laura VA. *Sistemas silvipastoris: introdução de árvores na pecuária do Centro-Oeste brasileiro*. 1.ed. Campo Grande:Embrapa Gado de Corte. 2004. 37p. (Documentos 146)

Ofugi C, Magalhães LL, Melido RCN, Silveira VP. Integração lavoura-pecuária (ILPF), sistemas agroflorestais (SAFs). In: Trecenti R, Oliveira MC, Hass G, editors. *Integração lavoura-pecuária-silvicultura: boletim técnico*. Brasília: MAPA/SDC. 2008. p.20-25.

Oliveira JM, Madari BE, Carvalho MTDM, Assis PCR, Silveira ALR, Leles Lima M, Wruck, FJ, Medeiros JC. Machado PLOA. Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. *Reg Environ Chang*. 2018; 18: 105-116. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1146-0>

Oliveira SM, Almeida REM, Junior CP, Reis AFB, Souza LFN, Favarin JL. Contribution of corn intercropped with brachiaria species to nutrient cycling. *Pesqui Agropecu Trop*. 2019; 49: e55018. <https://doi.org/10.1590/1983-40632019v4955018>

Oliveira PPA, Berndt A, Pedroso AF, Alves TC, Pezzopane JRM, Sakamoto LS, Henrique FL, Rodrigues PHM. Greenhouse gas balance and carbon footprint of pasture-based beef cattle production systems in the tropical region (Atlantic Forest biome). *Animal*. 2020; 1: 1-11. <https://doi.org/10.1017/S1751731120001822>

Ong CK. Quantifying the effects of tree–crop interaction. In: Ong CK, Huxley P, editors. *Tree–crop interactions*. Wallingford: CAB International Press. 1996. p. 1–23.

Pacciullo DSC, Campos NR, Gomide CAM. Castro CRT, Tavella RC, Rossiello ROP. Crescimento de capim-braquiária influenciado pelo nível de sombreamento e pela estação do ano. *Pesqui Agropecu Bras*. 2008; 43: 917-923. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X200800070001>

Pezzopane JRM, Bonani WL, Bosi C, Rocha ELF, Bernardi ACC, Pedroso AF. Reducing competition in a crop–livestock–forest integrated system by thinning eucalyptus trees. *Exp Agric*. 2020a; 56: 574-586. <https://doi.org/10.1017/S0014479720000162>

Pezzopane JRM, Bosi C, de Campos Bernardi AC, Oliveira PPA. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: Productivity parameters and PAR transmittance. *Agric Ecosyst Environ*. 2021; 312: 107350. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350>

Pezzopane JRM, De Campos Bernardi AC, Azenha MV, Oliveira PPA, Cristiam B, Pedroso AF, Esteves, SN. Production and nutritive value of pastures in integrated livestock production systems: Shading and management effects. *Sci Agric*. 2020b; 77: 20180150. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2018-0150>

Pezzopane JRM, Nicodemo MLF, Bosi C, Garcia AR, Lulu J. Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. *J Therm Biol*. 2019a; 79: 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015>

Pezzopane JRM, Bernardi ACC, Bosi C, Oliveira PPA, Marconato MH, Pedroso AF, Esteves SN. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. *Agroforestry Systems*. 2019b; 93: 39–49. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0149-7>

Pezzopane JRM, Bosi C, Nicodemo MLF, Santos PM, Cruz PG, Parmejiani RS. Microclimate and soil moisture in a silvopastoral system in southeastern Brazil. *Bragantia*. 2015; 74: 110-119. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0334>

Pires GC. Alterações de curto prazo em indicadores de qualidade do solo em sistema integrado de produção agropecuária com diferentes estratégias de adubação no Cerrado. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2021. 55p.

Porfirio-da-Silva V, Medrado MJS, Nicodemo MLF, Dereti RM. Arborização de pastagens com espécies florestais madeireiras: implantação e manejo. 1. ed. Colombo: Embrapa Florestas. 2010. 48p.

Portilho IIR, Scorza Júnior RP, Salton JC, Mendes IM, Mercante FM. Persistência de inseticidas e parâmetros microbiológicos em solo sob sistemas de manejo. *Cienc Rural*. 2015; 45: 22-28. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20131328>

Rajj B, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JÁ. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico. 2001. 285 p.

Ramankutty N, Mehrabi Z, Waha K, Jarvis L, Kremen C, Herrero M, Rieseberg LH. Trends in global agricultural land use: implications for environmental health and food security. *Annu Rev Plant Biol*. 2018; 69: 789-815. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040256>

Ramos FT, Dores EFGC, Weber OLS, Beber DC, Campelo Jr JH, Maia JCS. Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soils under no-till farming in Brazil. *J Sci Food Agric*. 2018; 98: 3595-3602. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8881>

Reeder JD, Schuman GE. Influence of livestock grazing on C sequestration in semi-arid mixed-grass and short-grass rangelands. *Environ Pollut*. 2002; 116: 457-63. doi: 10.1016/S0269-7491(01)00223-8

Rockstrom J, Williams J, Daily G, Noble A, Matthews N, Gordon L, Wetterstrand H, Declerck F, Shah M, Steduto P, Fritzsche C, Hatibu N, Unver O, Bird J, Sibanda L, Smith J. Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Ambio*. 2016;46: 4-17. <https://doi.org/10.1007/s13280-016-0793-6>

Sá JCDM, Tivet F, Lal R, Briedis C, Hartman, DC, Santos JF. Long-term tillage systems impact on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. *Soil Tillage Res*. 2014; 136: 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.010>

Sá JCM, Lal R, Cerri CC, Lorenz K, Hungria M, Carvalho PCF. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. *Environ Int*. 2017; 98: 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.10.020>

Sá TDA. Aspectos climáticos associados a sistemas agroflorestais: implicações no planejamento e manejo em regiões tropicais. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais*; 1994. Porto Velho, Brasil. Colombo: Embrapa. 1994. p.391-431

Salton JC, Hernani LC, Fontes CZ. Sistema Plantio Direto: 500 perguntas 500 respostas. 1. ed. Brasília: Embrapa;1998.

Salton JC, Mercante FM, Tomazi M, Zanatta JA, Conceição G, Silva WM, Retore M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. *Agric Ecosyst Environ.* 2014; 190: 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.023>

Sandini IE, Moraes A, Pelissari A, Neumann M, Falbo MK, Novakowski JH. Efeito residual do nitrogênio na cultura do milho no sistema de produção integração lavoura-pecuária. *Cienc Rural.* 2011; 41: 1315–1322. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782011005000099>

Sarto MVM, Borges WLB, Sarto JRW, Rice CW, Rosolem CA. Root and shoot interactions in a tropical integrated crop–livestock–forest system. *Agric Syst.* 2020a; 181: 102796. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102796>

Sarto MVM, Borges WLB, Sarto JRW, Rice CW, Rosolem CA. Deep soil carbon stock, origin, and root interaction in a tropical integrated crop – livestock system. *Agrofor Syst.* 2020b; 94: 1865-1877. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00505-6>

Sarto MVM, Borges WLB, Sarto JRW, Pires, CAB, Rice CW, Rosolem CA. Soil microbial community and activity in a tropical integrated crop-livestock system. *Appl Soil Ecol.* 2020c; 145: 103350. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.08.012>

Sartor LR, Sandini IE, Adami PF, Novakowski JH, Ruthes BES. Corn yield and grain nutritional status in a crop-livestock system with winter/summer nitrogen levels. *Int J Plant Prod.* 2018; 12: 309–314. <https://doi.org/10.1007/s42106-018-0028-9>

SBCS/NEPAR – Núcleo Estadual do Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná. 2. ed. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Estadual do Paraná. 2019.

Serra A. P, Almeida RG, Laura VA, Ferreira AD. Fundamentos técnicos para implantação de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta com eucalipto. In: Bungestab DJ, Almeida RG, Laura VA, Balbino LC, Ferreira AD (Ed.). *ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta*, 1. ed. Brasília: Embrapa. 2019. p. 347-365.

Silva VP. Produtividade em sistema de integração lavoura-pecuária - floresta no subtropico brasileiro [tese]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 2012.

Simmelsgaard SE. The effect of crop, N-level, soil type and drainage on nitrate leaching from Danish soil. *Soil Use Manag.* 1998; 14(1): 30-36.

Smith P, House JI, Bustamante M, et al. Global change pressures on soils from land use and management. *Glob Chang Biol.* 2016; 22: 1008–1028. <https://doi.org/10.1111/gcb.13068>

Sousa LF, Mauricio RM, Gonçalves LC, et al. Produtividade e valor nutritivo da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu em um sistema silvipastoril. *Arq Bras Med Vet Zootec.* 2007; 59: 1029-1037. <https://doi.org/10.1590/S0102-09352007000400032>

Soussana JF, Lemaire G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agric Ecosyst Environ.* 2014; 190: 9-17. doi: 10.1016/j.agee.2013.10.012

Souza ED, Silva FD, Pacheco LP, et al (2018) Matéria Orgânica do Solo em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil. In: Souza ED, Silva FD, Assmann TS, Carneiro MAC, Carvalho PCF, Paulino, HB (Ed.). *Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil*. Tubarão, Copiart. 2018. p.107–122.

Stefan L, Hartmann M, Engbersen N, Six J, Schob C. Positive Effects of Crop Diversity on Productivity Driven by Changes in Soil Microbial Composition. *Front Microbiol.* 2021; 12: 6607. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.660749>

Steinauer K, Tilman D, Wragg PD, Cesarz S, Cowles JM, Pritsch K, Reich PB, Weisser WW, Eisenhauer N. Plant diversity effects on soil microbial functions and enzymes are stronger than warming in a grassland experiment. *Ecology.* 2015; 96: 99–112. <https://doi.org/10.1890/14-0088.1>

Tabatabai MA. Soil enzymes. In: Weaver RW, Angle S, Bottomley PS, Bezdicek D, Smith S, Tabatabai A, Wollum A (Ed.), *Methods of Soil Analysis Part 2: Microbiological and Biochemical Properties*. Madison: Soil Science Society of America. 1994. p.778-833.

Tabatabai MA, Bremner JM. Arylsulfatase activity of soils. *Soil Sci Soc Am Proc.* 1970; 34: 225-229. <https://doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400020016x>

Thomason WE, Raun WR, Johnson GV. Winter wheat fertilizer nitrogen use efficiency in grain and forage production systems. *J Plant Nutr.* 1998; 23: 1505–1516. <https://doi.org/10.1080/01904160009382118>

Tiemann LK, Grandy AS, Atkinson EE, Marin-Spiotta E, Mcdaniel MD. Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. *Ecol Lett.* 2015; 18: 761-771. <https://doi.org/10.1111/ele.12453>

Vermeulen S, Bossio D, Lehmann J, Luu P, Paustian K, Webb C, Augé F, Bacudo I, Baedeker T, Havemann T, Jones C. A global agenda for collective action on soil carbon. *Nature Sustainability.* 2019; 2: 2-4. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0212-z>

Whitehead DC. *Nutrient elements in grassland*. 1 ed. Wallingford: CABI Publishing. 2000.

Wilson JR. Influence of planting four tree species on the yield and soil water status of gree panic pasture in subhumid south-east Queensland. *Tropical Grasslands.* 1998; 32: 209-220.

Yuan M, Duan J, Li J, Jian S, Gamage L, Dzantor KE, Hui D, Fay PA. Effects of nitrogen fertilization and bioenergy crop species on central tendency and spatial heterogeneity of soil glycosidase activities. *Sci Rep.* 2020; 10: 19681. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76837-1>

Zago LMS, Ramalho WP, Caramori S. Does crop-livestock-forest systems contribute to soil quality in Brazilian savannas? *Floresta e Ambiente.* 2019; 26: 1–10. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.034318>

Zhang X, Dong W, Dai X, Schaeffer S, Yang F, Radosevich M, Xu L, Liu X, Sun X. Responses of absolute and specific soil enzyme activities to long term additions of organic and mineral fertilizer. *Sci Total Environ.* 2015; 536: 59-67. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.043>