

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA E INFLUÊNCIA DO
SOLO NA PRODUTIVIDADE, MASSA DE FORRAGEM E
VALOR NUTRITIVO DE CAPIM MARANDU EM SISTEMAS
DE PRODUÇÃO ANIMAL**

Camila Eduarda Souza de Sousa
Engenheira Agrônoma

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA E INFLUÊNCIA DO
SOLO NA PRODUTIVIDADE, MASSA DE FORRAGEM E
VALOR NUTRITIVO DE CAPIM MARANDU EM SISTEMAS
DE PRODUÇÃO ANIMAL**

**Discente: Camila Eduarda Souza de Sousa
Orientadora: Prof. Dra. Ana Cláudia Ruggieri**

**Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de
Jaboticabal, como parte das exigências para
a obtenção do título de Doutora em Ciência
Animal**

S729d

Souza de Sousa, Camila Eduarda

Dinâmica da matéria orgânica e influência do solo na produtividade, massa de forragem e valor nutritivo de capim marandu em sistemas de produção animal / Camila Eduarda Souza de Sousa. -- Jaboticabal, 2025

85 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientadora: Ana Cláudia Ruggieri

1. Carbono no solo. 2. Ciclagem de nutrientes. 3. Pastagem perene. 4. Sistema integrado. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA, MASSA DE FORRAGEM E VALOR NUTRITIVO DE CAPIM MARANDU EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO ANIMAL

AUTORA: CAMILA EDUARDA SOUZA DE SOUSA

ORIENTADORA: ANA CLÁUDIA RUGGIERI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Ciência Animal, área: Nutrição Animal pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br ANA CLÁUDIA RUGGIERI
Data: 16/04/2025 18:27:03-0303
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. ANA CLÁUDIA RUGGIERI (Participação Presencial)
Departamento de Zootecnia / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br ABMAEL DA SILVA CARDOSO
Data: 16/04/2025 17:05:19-0303
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Pós-Doutorando ABMAEL DA SILVA CARDOSO (Participação Virtual)
Departamento Plant and Agroecosystem Sciences / University of Wisconsin - Madison/Wisconsin/EUA

Documento assinado digitalmente
gov.br JORGE CARDOSO DE AZEVEDO
Data: 16/04/2025 18:41:05-0303
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Pesquisador Dr. JORGE CARDOSO DE AZEVEDO (Participação Virtual)
Departamento de Zootecnia / Universidade Rural da Amazônia (UFRA) - Belém/PA

Documento assinado digitalmente
gov.br NAUARA MOURA LAGE FILHO
Data: 16/04/2025 18:52:25-0303
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. NAUARA MOURA LAGE FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Zootecnia / Universidade Federal de Roraima (UFRR) - Boa Vista/RR

Documento assinado digitalmente
gov.br WILTON LADEIRA DA SILVA
Data: 16/04/2025 18:28:49-0303
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. WILTON LADEIRA DA SILVA (Participação Virtual)
Departamento de Zootecnia / Universidade Federal de Goiás (UFG) - Goiânia/GO

Jaboticabal, 16 de abril de 2025

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Camila Eduarda Souza de Sousa, nascida em 16 de junho de 1993 na cidade de Belém, PA, Brasil. Obteve diploma de engenheira agrônoma pela Universidade Federal Rural da Amazônia em dezembro de 2019. Iniciou o mestrado em Ciência Animal em março 2020 na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro seguindo a linha de pesquisa de carbono no solo de sistemas integrados e pastagens, e obteve o título de mestra em Ciência Animal no ano de 2022. Entre os anos de 2021 e 2022, durante o mestrado, foi bolsista de treinamento técnico 1 pela FAPESP na Universidade Estadual Paulista, trabalhando com metodologias de avaliação de emissão de gases do efeito estufa em pastagem, onde teve o primeiro contato com o Laboratório de Forragicultura. Em 2022 ingressou como aluna de doutorado no programa de Ciência Animal na Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho sob orientação da Profa. Dra. Ana Cláudia Ruggieri no laboratório de forragicultura e pastagens. Durante o doutorado alcançou conceito máximo em todas as disciplinas cursadas. Entre abril de 2024 e abril de 2025 realizou período sanduíche na Universidade da Flórida, EUA. Sua atuação profissional concentrou-se principalmente nas áreas de forragicultura e pastagens, sistemas integrados, dinâmica de carbono no solo e nitrogênio do solo, e emissão de gases do efeito estufa.

A oportunidade é um cavalo selado
Que não passa duas vezes

AGRADECIMENTOS

A Deus e ao universo por sempre guiarem meu caminho da melhor forma possível, e me dar discernimento para fazer escolhas certas.

A Universidade Estadual Paulista por ter me proporcionado uma grande bagagem de conhecimento.

A FAPESP por conceder financiamento para realização dessa pesquisa através do projeto 201924123-0.

A minha mãe Rosilene Souza de Sousa, meu pai Ricardo Augusto Sousa de Sousa, e minha irmã Vanessa Cristine Souza de Sousa pelo suporte, preocupação, e por apoiarem as minhas decisões, por mais que elas tenham me levado para longe de casa. Obrigada por tudo. Amo vocês.

Ao meu marido João Humberto Ruggieri Tonhati por não largar a minha mão em nenhum momento, por entender a rotina que a pós-graduação exigiu de mim, por me amar e por me incentivar a sempre dar o meu melhor.

A minha orientadora, amiga, e sogra Ana Claudia Ruggieri, que me acolheu, acreditou no meu potencial, e mudou tanto minha vida profissional quanto pessoal. Todos os anos que eu viver não serão suficientes para agradecer tudo o que foi feito por mim.

A todos meus familiares pela torcida para que tudo desse certo até aqui.

Ao meu sogro Humberto Tonhati por toda a preocupação e cuidado

Ao Dr. Abmael da Silva Cardoso pela amizade, encorajamento, e contribuição ao Laboratório de Forragicultura com o projeto que permitiu meu doutorado.

Ao meu amigo de pós-graduação Francisco Paulo Amaral Junior por ter passado todos esses anos sendo minha dupla. Fizemos um bom trabalho juntos.

A todos os meus amigos do setor de forragicultura que fizeram do ambiente do laboratório um local de trabalho leve, tranquilo, e cheio de pausas para o café.

Ao professor José Dubeux e aos amigos que fiz na Universidade da Flórida,

A todos que, de algum modo, contribuíram para a realização deste trabalho

A mim mesma, por ter tido coragem.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Matéria orgânica do solo e manejos conservacionistas	4
2.2 O solo como reservatório de carbono e nitrogênio	6
2.3 Sistemas de uso do solo e seus efeitos sobre o carbono e nitrogênio	9
2.4 Relação entre qualidade do solo e valor nutritivo das gramíneas	12
3 REFERÊNCIAS	14
CAPÍTULO 2 – Dinâmica de carbono no solo e ciclagem de nitrogênio sob diferentes estratégias de gerenciamento de pastagens	20
1 INTRODUÇÃO	22
2 MATERIAL E MÉTODOS	24
2.1 Área de estudo	24
2.2 Coleta de solo e raízes	26
2.3 Análises químico-físicas	27
2.3 Atividade biológica do solo	27
2.4 Cálculo de estoque de carbono e índice de manejo do carbono	28
3. RESULTADOS	29
3.1 Densidade do solo	29
3.2 Massa de raízes	31
3.3 Carbono orgânico total e frações de carbono	31
3.3 Nitrogênio total e nitrogênio inorgânico	32
3.4 Atividade biológica do solo	34
3.5 Estoque de carbono e índice de manejo do carbono	34
4.DISCUSSÃO	35
4.1 Dinâmica de raízes e densidade do solo	35
4.2 Dinâmica do carbono no solo	38
4.3 Estoque de carbono e índice de manejo do carbono	41
4.4 Dinâmica do nitrogênio no solo	42
5. CONCLUSÃO	45
6. REFERÊNCIAS	45
CAPÍTULO 3 – Produtividade e valor nutritivo de <i>Urochloa brizantha</i> cv. Marandu cultivado sob monocultivo e sistema integrado	52

1 INTRODUÇÃO	54
2. MATERIAL E MÉTODOS	56
2.1 Área de estudo	56
2.4 Valor nutritivo	58
2.5 Análise estatística	58
3 RESULTADOS	59
3.1 Massa de forragem e composição morfológica	59
3.2 Valor nutritivo e produção de metano	60
3.3 Análise de componentes principais	60
4. DISCUSSÃO	62
4.2 Valor nutritivo de gramíneas	64
4.3 Análise de componentes principais	66
5. CONCLUSÃO	67
6. REFERÊNCIAS	67
CAPÍTULO 4: Implicações do sistema integrado soja-milho-capim na saúde do solo, sustentabilidade e lucratividade	71
1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
2. REFERÊNCIAS	73

DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA E INFLUÊNCIA DO SOLO NA PRODUTIVIDADE, MASSA DE FORRAGEM E VALOR NUTRITIVO DE CAPIM MARANDU EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO ANIMAL

RESUMO – A produção animal em pastagens é um dos principais sistemas utilizados na pecuária brasileira, e há uma crescente busca por intensificação da produção sem comprometer a produtividade e a sustentabilidade do sistema. Neste trabalho, avaliamos os impactos da integração entre culturas e do manejo de pastagem perene em monocultivo sobre características produtivas, qualitativas dos sistemas de produção animal. Analisamos a dinâmica do carbono e do nitrogênio associados a indicadores de qualidade do solo, em três diferentes sistemas de uso da terra: pastagem em monocultivo (PM), sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) e vegetação nativa (VN), além da resposta da gramínea aos manejos aplicados em ILP e PM. O estudo foi conduzido durante dois anos, com coletas de solo em três momentos distintos para análise da matéria orgânica, frações de carbono (total, lábil e solúvel), nitrogênio total e inorgânico, densidade do solo e emissão de CO₂ microbiano, e dois momentos de coleta de biomassa radicular. Durante a condução do experimento, amostras de *Urochloa brizantha* cv. Marandu cultivada nos sistemas PM e ILP foram coletadas a cada ciclo pré-pastejo, analisadas quanto à composição morfológica, valor nutritivo, e potencial de produção de metano *in vitro*. Os resultados encontrados mostram que o sistema ILP pode causar perdas de carbono em decorrência da implantação dos sistemas, mas promove a rápida recuperação de carbono total após o segundo ano de manejo, acompanhada do aumento das frações lábeis de carbono e maior eficiência na ciclagem do nitrogênio, estimulando a atividade microbiana. O ILP também irá favorecer a estrutura do solo, promovendo redução da densidade aparente e aproximando a saúde deste solo à da vegetação nativa. No aspecto produtivo da gramínea dos sistemas ILP e PM, apesar da igualdade tanto para produção de massa de forragem quanto para emissão de CH₄, a forrageira cultivada no ILP apresentou maior porcentagem de folhas e maior valor nutritivo, fatores-chave para a maior produtividade animal, podendo acarretar menor impacto ambiental por quilo de produto final. Com nossos resultados, confirmamos a influência positiva de sistemas integrados sob a maior qualidade de *Urochloa brizantha* cv. Marandu. Os dados encontrados neste trabalho indicam que a intensificação sustentável, por meio da integração lavoura-pecuária, representa uma estratégia promissora para conciliar produtividade, recuperação do solo e mitigação de impactos ambientais na pecuária tropical, mas deve ser acompanhada a longo prazo.

Palavras-chave: carbono no solo, ciclagem de nutrientes, pastagem perene, sistema integrado

**Dynamics of soil organic matter and influence of soil on productivity,
forage mass, and nutritive value of marandu grass in animal production
systems**

ABSTRACT - Animal production on pastures is one of the main systems used in Brazilian livestock farming, with a growing demand for intensification without compromising productivity and system sustainability. In this study, we evaluated the impacts of crop integration and monoculture perennial pasture management on productive characteristics and the quality of animal production systems. We analyzed carbon and nitrogen dynamics associated with soil quality indicators across three land-use systems: monoculture pasture (PM), crop-livestock integration (CLI), and native vegetation (NV), as well as the response of forage grass to management practices in CLI and PM. The study was conducted over two years, with soil sampling at three distinct times to assess organic matter, carbon fractions (total, labile, and soluble), total and inorganic nitrogen, root biomass, soil density, and microbial CO₂ emissions. During the experiment, samples of *Urochloa brizantha* cv. Marandu, cultivated in PM and CLI systems, were collected pre-grazing and analyzed for morphological composition, nutritive value, and *in vitro* methane production potential. Results show that CLI systems may initially incur carbon losses during implementation but promote rapid recovery of total carbon after the second year of management. This recovery is accompanied by increases in labile carbon fractions, improved nitrogen cycling efficiency, stimulated microbial activity, and enhanced soil structure (reduced bulk density), bringing soil health closer to that of native vegetation. Regarding forage productivity in CLI and PM systems, despite similar forage mass production and CH₄ emissions, CLI-grown forage exhibited a higher leaf percentage and superior nutritive value—key factors for enhanced animal productivity and lower environmental impact per kilogram of final product. Our findings confirm the positive influence of integrated systems on the quality of *Urochloa brizantha* cv. Marandu. The data suggests that sustainable intensification through crop-livestock integration represents a promising strategy to reconcile productivity, soil restoration, and mitigation of environmental impacts in tropical livestock systems, though long-term monitoring is essential.

Keywords: integrated system, nutrient cycling, perennial pasture, soil carbon

CAPÍTULO 1 - Considerações gerais

1 INTRODUÇÃO

As forrageiras têm desempenhado um papel fundamental na evolução da pecuária ao longo dos séculos. Desde as primeiras civilizações a domesticação de animais exigiu a disponibilidade de pastagens para fornecimento de alimento. Em regiões tropicais e subtropicais, gramíneas e leguminosas nativas foram historicamente utilizadas para a nutrição animal, mas com o avanço da pecuária e da agricultura novas espécies foram introduzidas e manejadas para maximizar a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas de produção.

No Brasil, a introdução de gramíneas forrageiras ocorreu principalmente no século XX, com destaque para espécies do gênero *Urochloa*, originárias da África, e sendo conhecidas pela alta produtividade e capacidade de adaptação a diferentes condições edafoclimáticas. Essas gramíneas passaram a ser cultivadas em larga escala com a expansão da fronteira agropecuária, onde extensas áreas foram convertidas em pastagens para atender à crescente demanda por carne bovina.

A evolução das pastagens trouxe avanços significativos para a pecuária. A pesquisa e o desenvolvimento de novas cultivares de forrageiras contribuíram para sistemas mais produtivos, resistentes a pragas, doenças e adaptadas a condições climáticas adversas. O desenvolvimento contínuo de tecnologias voltadas à melhoria da qualidade das pastagens e a adaptação da agropecuária aos diferentes cenários climáticos foi determinante para o futuro da produção.

Pastagens são sistemas complexos que envolvem uma interação entre solo, planta, animal, e ambiente, com cada fator influenciando diretamente o outro. A qualidade do solo é um dos fatores que chama atenção, uma vez que a matéria orgânica, a fertilidade, a estrutura e a capacidade de retenção de nutrientes influenciam o crescimento e o valor nutritivo das forrageiras, além de mitigar gases do efeito estufa. O solo de pastagens bem manejadas apresenta alto potencial de ciclagem de nutrientes e capacidade de armazenar carbono. São solos que não passam por fortes perturbações, e apresentam uma dinâmica de deposição e

mineralização da matéria orgânica que disponibiliza nutrientes para a planta sem esgotar o solo.

Apesar dos fortes incentivos para o manejo de recuperação de pastagem, a pecuária brasileira ainda mantém grandes áreas agricultáveis ocupadas com pastagens de baixo vigor, que deixam de atuar como sumidouros de carbono, passando a emitir CO₂ em decorrência da degradação do solo. Diversas razões podem facilitar o abandono de pastagens. Na região Norte do Brasil, é comum que áreas antigas sejam abandonadas em favor da abertura de novas áreas, uma vez que a remoção da vegetação nativa expõe um solo com reservas de nutrientes suficientes para o crescimento das gramíneas. Já nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, a combinação entre a sazonalidade da produção forrageira, que força o produtor a oferecer suplementação alimentar, e as oscilações no preço dos produtos bovinos faz com que muitos produtores reduzam os investimentos nas pastagens.

Durante décadas, a pecuária extensiva foi baseada em pastagens não manejadas, que com o tempo apresentavam algum nível de degradação, resultando em queda na produtividade tanto da gramínea quanto dos animais, e aumento da degradação do solo. Como resposta a esse cenário surgiram práticas de manejo aprimoradas, como a adubação de pastagens, o manejo racional e a integração lavoura-pecuária. Essas práticas promovem o aumento da produtividade forrageira, melhoram a fertilidade do solo e reduzem os impactos ambientais da produção.

O sistema de integração lavoura pecuária não é uma prática recente, e começou a ser difundida no Brasil em 1991 quando a Embrapa lançou o sistema barreirão, que sugeria integrar culturas anuais com forrageiras para recuperação de pastagens, porém apenas alguns anos depois os sistemas integrados ganharam atenção. Em 2015, durante o acordo de Paris, o Brasil assumiu o compromisso de recuperar 15 milhões de hectares de pastagem até 2030, e em 2023 o governo assinou um decreto que viabilizou o acesso a financiamentos para a conversão de 40 milhões de hectares de pastagens degradadas em sistemas de produção sustentáveis. O uso de sistemas integrados vem sendo incentivado como resultado dos benefícios que a integração lavoura pecuária pode trazer para o solo, para o ambiente, e para o produtor.

A integração lavoura pecuária com plantio direto é uma forma eficiente de evitar o revolvimento do solo e a quebra dos agregados, acumular resíduos vegetais da cultura anual ou da dessecação da forrageira, manter uma cultura de cobertura em época de sazonalidade da gramínea, proporcionar ao solo maior diversidade microbiana, obter diversidade de produção e promover a descarbonização.

O processo de sequestro do carbono no solo demanda tempo, e são crescentes os estudos avaliando a dinâmica da matéria orgânica e o tempo de permanência do carbono em sistemas integrados. Contudo, a vasta extensão territorial do Brasil, com diferentes tipos de solo, vegetação, e clima, exige que a dinâmica do carbono no solo seja avaliada respeitando as particularidades de cada bioma, e em uma escala temporal de longo prazo. Isso pode ajudar na elaboração de estratégias de recuperação de pastagem que funcionem de acordo com as limitações de cada região.

A eficiência que sistemas de pastagem ou sistema integrados apresentam para promover a saúde do solo pode ser avaliada através das mudanças em indicadores sensíveis como carbono lábil e a biomassa microbiana. O carbono lábil é a forma mais instável do carbono e mais acessível à decomposição microbiana. Essa fração do carbono funciona como um indicador de entrada de material orgânico no sistema e pode ser usado na predição do potencial do solo em armazenar carbono ao longo do tempo. A atividade microbiana para mineralização da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes geralmente é limitada pela disponibilidade de carbono lábil. Portanto o uso do solo impacta rapidamente a dinâmica do carbono, influenciando principalmente a deposição de matéria orgânica, a respiração microbiana, a emissão de CO₂, e a permanência do carbono no solo.

Este estudo se baseia na hipótese de que a intensificação sustentável de sistemas agrícolas integrados entre culturas anuais e gramíneas promove maior atividade microbiana no solo, mas também resulta em maior acúmulo de carbono e maior produtividade da pastagem a curto prazo no bioma Mata Atlântica. Os objetivos foram: (i) avaliar os efeitos de diferentes sistemas de produção nos indicadores de saúde do solo e suas interações com a estabilidade de carbono; (ii) investigar o impacto da intensificação de pastagens nos reservatórios lábeis de C; (iii) identificar os principais fatores químicos, físicos e biológicos que influenciam os reservatórios de

carbono em sistemas integrados; (iv) avaliar as características produtivas e o valor nutritivo das gramíneas produzidas quando em monocultivo e em sistemas integrados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Matéria orgânica do solo e manejos conservacionistas

A matéria orgânica do solo engloba os resíduos vegetais, animais em diferentes estágios de decomposição, biomassa microbiana, raízes, e as frações mais lábeis e estáveis de carbono (Osman, 2013). Em relação a estrutura, a matéria orgânica apresenta cerca de 58% de moléculas de carbono (C) e menores quantidade de nitrogênio (N), oxigênio e hidrogênio (Pribyl, 2010), e apesar de representar uma proporção pequena em relação a fração mineral, a matéria orgânica exerce efeitos importantes sobre os atributos físicos, como densidade e agregação, químicos, como a capacidade de troca catiônica e liberação de nutrientes, e biológicos do solo, como disponibilidade de energia aos microrganismos (Fageria, 2012), sendo essencial para a preservação da qualidade e da sustentabilidade dos solos agrícolas.

Em condições equilibradas o solo apresenta uma dinâmica entre as entradas e saídas de C. As entradas ocorrem através da fotossíntese e da deposição de resíduos orgânicos, e a saída ocorre pela decomposição desses resíduos e respiração microbiana. O processo de fotossíntese captura dióxido de carbono (CO_2) atmosférico que é fixado nos tecidos das plantas, e durante o ciclo de vida parte do C fixado via fotossíntese é depositado ao longo do perfil do solo por meio de exsudados radiculares, enquanto parte é incorporado na forma de matéria orgânica pela adição de resíduos acima e abaixo do solo (Pillon et al., 2002). A atuação da macrofauna reduz o tamanho das partículas orgânicas aumentando a área de exposição para colonização dos microrganismos decompositores. Os compostos orgânicos dos resíduos servem como fonte de C e energia para o funcionamento do metabolismo da microbiota, e na cadeia respiratória desses microrganismos ocorre a oxidação dos substratos, quando parte do carbono retorna para atmosfera na forma de CO_2 , enquanto uma pequena quantidade é incorporada como carbono orgânico (Khatoon et al., 2017). Portanto, o acúmulo de C no solo e a emissão de C para a atmosfera

depende diretamente da adição de resíduos e da atividade microbiana. A amplitude entre adição e perda de C indica se o sistema de manejo está em direção a sustentabilidade ou degradação.

Os dois principais fatores que influenciam o sequestro de carbono são a capacidade do sistema em aumentar a incorporação de matéria orgânica no solo, e a redução da taxa de decomposição da matéria orgânica sem prejuízos à ciclagem de nutrientes (Xu et al., 2020). De maneira geral, quando há conversão de florestas primárias em sistemas agrícolas ocorre redução nos teores de C orgânico do solo, que podem chegar a até 40%, e podem ser intensificadas dependendo da zona climática e do tipo de solo (Guo e Gifford, 2002). Após a conversão o novo estado de equilíbrio do sistema dependerá da intensidade de manejo, podendo ser baixo em sistemas de pastagem extensiva ou cultivo convencional, ou alto como ocorre em sistema de plantio direto e sistemas integrados.

Entre os indicadores de qualidade relacionados à matéria orgânica do solo após a conversão de floresta para sistemas agropecuários, em climas tropicais, o carbono orgânico é um atributo que deve ser acompanhado, pois dependendo do sistema de manejo adotado a concentração de C no solo pode se manter estável, aumentar, ou diminuir em relação a áreas de floresta. Apesar do impacto causado ao solo pela remoção da vegetação florestal para o cultivo agrícola, os estoques de C podem ser recuperados quando são aplicados manejos adequados, com adição de matéria orgânica suficiente para superar as perdas.

Práticas como desmatamento, preparo convencional do solo, monocultivos e remoção de biomassa podem ser substituídas pelo reflorestamento, cultivo mínimo ou plantio direto e integração lavoura-pecuária. Nesse cenário, as práticas conservacionistas como o plantio direto associado à integração lavoura pecuária se destaca em detrimento aos sistemas que utilizam prática convencionais de cultivo (Machebe et al., 2023). Os cultivos convencionais potencializam a mineralização da matéria orgânica do solo a partir do revolvimento que acelera a oxidação da matéria orgânica. Em solos estáveis, a matéria orgânica é fisicamente protegida da decomposição microbiana, e após o revolvimento o carbono anteriormente protegido é exposto, facilitando o acesso dos microrganismos (Pillon et al., 2002)

A perda de matéria orgânica quando o solo é perturbado pode ser duplicada em relação a um sistema de manejo sem revolvimento (Bayer et al., 2000). No caso dos sistemas conservacionistas a ausência de revolvimento por implementos agrícolas promove a manutenção e formação de agregados do solo, propiciando o aumento de compostos orgânicos preservados da ação biológica, refletindo o aumento da concentração de C no solo (Machebe et al., 2023). O sistema de plantio direto tem como característica principal a perturbação mínima do solo apenas na linha de semeadura, e foi introduzido no sul do Brasil nos anos 70 com intuito de desacelerar a degradação provocada pela erosão devido ao preparo intensivo (Amado et al., 2006). Desde então o plantio direto tem sido usado como uma estratégia de manejo amplamente difundida por proporcionar melhorias nas condições edáficas.

A evolução das tecnologias de plantio associou a técnica de plantio direto com o método de produção integrada, e esse sistema agropecuário tem sido utilizado como uma estratégia de produção sustentável, que associa produção agrícola e pecuária em uma mesma área, com o revolvimento mínimo do solo, podendo ser realizado em cultivo consorciado, em rotação, ou em sucessão de culturas.

Os sistemas integrados têm potencial de contribuir com maior sequestro de C no solo e com a redução de emissões de GEE, pois além da diversidade no *input* de matéria orgânica, o sistema suporta uma área de pastagem, um sistema de produção animal com alto potencial de armazenamento de C (Martin et al., 2020). Ainda há necessidade de estudos mais detalhados para melhor entendimento da dinâmica da matéria orgânica, especialmente em sistema integrados que apresentam diferentes combinações de culturas e manejos.

2.2 O solo como reservatório de carbono e nitrogênio

O solo é um dos componentes essenciais dos ecossistemas agropecuários, desempenhando funções que vão além do suporte físico para as plantas. O solo atua como um reservatório de nutrientes, regula o ciclo da água, sustenta a biodiversidade microbiana e influencia diretamente a produtividade agrícola e pecuária (Smith et al., 2015). A fertilidade do solo é definida pela sua capacidade de fornecer os nutrientes

necessários ao crescimento das plantas, e é um fator determinante para a longevidade e eficiência dos sistemas agrícolas (Husein et al., 2021).

O manejo ambiental adequado do solo é fundamental para evitar a degradação e garantir a sustentabilidade produtiva. Práticas como rotação de culturas, adubação orgânica e mineral, plantio direto e sistemas integrados têm sido amplamente estudadas como estratégias para melhorar a estrutura, aumentar a retenção de carbono e nitrogênio, e reduzir as perdas de nutrientes por lixiviação e erosão (Hussain et al., 2021). Entre os diversos atributos que compõem a fertilidade do solo, o carbono e o nitrogênio desempenham um papel fundamental na ciclagem, disponibilidade de nutrientes, e na dinâmica dos ecossistemas (Smith et al., 2015). A ciclagem do carbono e do nitrogênio é influenciada pelo manejo adotado no solo, e a concentração desses nutrientes é fator crítico para a compreensão dos impactos ambientais e produtivos de diferentes sistemas de uso da terra (Merante et al., 2017).

A matéria orgânica do solo (MOS) atua como um reservatório de C e N, regulando os processos biogeoquímicos que afetam a sustentabilidade dos agroecossistemas (Lehmann e Kleber, 2015). A manutenção e a dinâmica desses elementos podem impactar a qualidade do solo e sua capacidade de sustentar a produção vegetal a longo prazo. Neste contexto, a compreensão das frações de carbono e nitrogênio sob diferentes manejos do solo, bem como os processos que governam a ciclagem desses nutrientes, facilitam a compreensão do impacto de diferentes sistemas de manejo sobre a fertilidade do solo.

O reservatório de carbono pode ser classificado em diferentes frações segundo Wander (2004): O carbono lábil corresponde à fração mais acessível aos microrganismos, influenciando diretamente a disponibilidade de nutrientes para as plantas, possui um tempo de residência curto no solo e responde de forma sensível ao manejo agrícola. O carbono particulado é composto por resíduos orgânicos em decomposição intermediária, funcionando como uma importante fonte de carbono para os microrganismos e contribuindo para a agregação do solo. Já o carbono estável ou recalcitrante está intimamente associado à fração mineral do solo, apresentando alta resistência à decomposição microbiana. Essa fração pode permanecer no solo por séculos, desempenhando um papel fundamental no sequestro de carbono e na mitigação das mudanças climáticas.

O balanço entre os processos de entrada e saída de carbono no solo é determinante para sua permanência e estabilidade, sendo o manejo agrícola um dos fatores que pode favorecer o acúmulo ou a perda de carbono (Purwanto e Alam, 2020). Práticas que favorecem a adição de biomassa ao solo, como a integração lavoura-pecuária e o plantio direto, contribuem para a manutenção dos estoques de C (Lemaire et al., 2014). Por outro lado, práticas agrícolas tradicionais como o revolvimento do solo aceleram a decomposição da matéria orgânica e reduzem a capacidade de retenção de carbono (Hussain et al., 2021). Além do impacto sobre a fertilidade do solo, o manejo do carbono influencia a emissão de gases do efeito estufa, como o dióxido de carbono e metano (Chataut et al., 2023).

O carbono e o nitrogênio são codependentes para a saúde da planta e do solo. O nitrogênio é um elemento fundamental para o crescimento vegetal, e um dos principais fatores limitantes da produtividade agrícola (Govindasamy et al., 2023). O solo contém nitrogênio em diversas formas, distribuídas entre a matéria orgânica e as formas inorgânicas disponíveis para as plantas. A ciclagem do nitrogênio envolve processos como fixação biológica, mineralização, imobilização, nitrificação e desnitrificação, que regulam sua disponibilidade no solo (Robertson e Groffman, 2015).

A fixação biológica do nitrogênio ocorre por meio de bactérias, como os rizóbios em simbiose com leguminosas, reduzindo a necessidade de fertilizantes sintéticos e melhorando a fertilidade do solo (Kebede, 2021). A mineralização transforma o nitrogênio orgânico em formas inorgânicas, representada pelo amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-), e são prontamente disponíveis para as plantas, enquanto a imobilização reduz essa disponibilidade ao incorporar nitrogênio inorgânico na biomassa microbiana (Grzyb et al., 2021). A nitrificação converte amônio em nitrato, facilitando a absorção pelas plantas, mas aumentando o risco de lixiviação (Ayiti e Babalola, 2022). Já a desnitrificação transforma nitrato em gases como óxido nitroso (N_2O) e nitrogênio molecular (N_2), reduzindo o nitrogênio disponível no solo e contribuindo para as emissões de gases do efeito estufa (Coskun et al., 2017). O equilíbrio entre essas formas depende da atividade microbiológica, e do uso e manejo do solo.

O manejo do sistema agropecuário também afeta a disponibilidade e as perdas de nitrogênio no solo. O uso de adubação verde, a rotação de culturas e a integração

lavoura-pecuária podem aumentar a retenção de nitrogênio e reduzir perdas por lixiviação (Baggs et al. 2000). Em contrapartida, o uso excessivo de fertilizantes nitrogenados pode levar à contaminação ambiental, favorecendo a lixiviação de nitratos para os corpos d'água e a emissão de óxido nitroso (Tyagi et al., 2022).

2.3 Sistemas de uso do solo e seus efeitos sobre o carbono e nitrogênio

Nos últimos anos foi crescente o interesse em sistemas de manejo agropecuários que conciliam produção eficiente e conservação dos recursos naturais, como os sistemas integrados. Esses sistemas combinam a produção agrícola com a criação animal em uma mesma área, promovendo inúmeros benefícios em decorrência da quantidade e diversidade de deposição de matéria orgânica (Lemaire et al., 2014). Mas apesar do crescente uso de sistemas integrados, ainda é prevalente no Brasil o sistema de monocultivo de forrageira. Esse tipo de sistema quando não manejado corretamente pode levar à degradação e perda de fertilidade do solo (Bogunovic et al., 2022).

Sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP), pastagem sob monocultivo de forrageiras e solo de floresta nativa apresentam características distintas quanto à retenção e ciclagem do carbono e do nitrogênio. Solos sob vegetação nativa são frequentemente utilizados como referência para avaliar o impacto da conversão agrícola (Blair, 1995). Esses solos possuem altos estoques de matéria orgânica, que garantem uma ciclagem eficiente de nutrientes e contribuem para a estabilidade do carbono (Lal, 2005). A deposição contínua de material vegetal e a ausência de distúrbios mecânicos favorecem a formação de agregados estáveis, reduzindo a degradação da matéria orgânica e a mineralização excessiva do carbono. Além disso, a presença de uma biodiversidade microbiana ativa promove a imobilização de nitrogênio, minimizando perdas por lixiviação e volatilização (Smith et al., 2015). A conversão de áreas de floresta para a agricultura impacta diretamente esses processos, levando a uma rápida redução do estoque de carbono devido ao aumento da decomposição da matéria orgânica e à remoção da vegetação (Lal, 2005).

A intensificação do uso do solo após mudança de uso da terra pode aumentar a lixiviação de nitrogênio, especialmente em solos com baixa concentração de argila

ou sujeitos a precipitações elevadas (Smith et al., 2015). A substituição da vegetação nativa por sistemas de produção modifica o equilíbrio natural do solo, sendo necessário adotar práticas de manejo que minimizem os impactos negativos sobre os estoques de carbono e nitrogênio. Os sistemas de integração lavoura-pecuária são uma alternativa viável para aumentar a retenção de C e N, mitigando os impactos negativos da agricultura intensiva, pois a alternância entre cultivos agrícolas e pastagens proporciona uma adição contínua de resíduos orgânicos ao solo, contribuindo para a manutenção dos estoques de carbono (Rakkar e Blanco-Canqui, 2018).

A presença de pastagens manejadas em sistemas integrados melhora a estrutura do solo e favorece a agregação da matéria orgânica, reduzindo as perdas por erosão e lixiviação (Martin et al., 2020). A introdução de forrageiras perenes nesses sistemas desempenha um papel essencial na ciclagem do carbono e do nitrogênio. As raízes profundas das gramíneas promovem a estabilização da matéria orgânica no perfil do solo por meio de micro e macroagregação, reduzindo a mineralização rápida do carbono e aumentando a proteção química e física do carbono (Poirier et al., 2018). Além disso, a deposição constante de biomassa vegetal pelas gramíneas contribui para o acúmulo de carbono lábil tanto em superfície quanto em profundidade (Sapkota et al., 2024). A pastagem em sistemas integrados também favorece a eficiência do uso do nitrogênio, pois a gramínea pode se beneficiar da adubação nitrogenada residual das culturas, ou do nitrogênio fixado por uma leguminosa através da fixação biológica, favorecendo uma ciclagem mais eficiente desse nutriente.

Apesar de todos os benefícios, a eficiência dos sistemas integrados requer cautela. O manejo inadequado do ILP pode resultar em desafios para a manutenção dos estoques de carbono e nitrogênio e perenidade do sistema. O pisoteio excessivo do gado ou o superpastejo logo após a implantação do sistema pode compactar o solo causando redução dos macroporos, diminuindo a aeração e causando deficiências de oxigênio, afetando negativamente a atividade de microrganismos responsáveis pelos processos bioquímicos do solo, prejudicando a recuperação da pastagem e o próximo cultivo agrícola (Santos et al., 2022). Além disso, a escolha inadequada das culturas

e a ausência de um planejamento adequado de rotação podem comprometer a eficiência desse sistema em longo prazo.

Atualmente o sistema amplamente utilizado na pecuária brasileira é a pastagem perene com uma espécie de gramínea forrageira, que também expressa grande potencial para armazenamento de carbono no solo quando bem manejado. Pastagens de longa duração não tem o solo perturbado por preparos agrícolas, e se forem bem manejadas apresentam um equilíbrio dinâmico de entrada e saída de nutrientes (Guillaume et al., 2021). A remoção do estrato pastejável pelo animal estimula o perfilhamento, a produção de novas raízes, e a rebrota do capim (Bogunovic et al., 2022), os nutrientes removidos retornam para a pastagem por meio das excretas dos animais (Sheldrick et al., 2003), e o manejo de adubação fornece nutrientes para o crescimento da forrageira sem esgotar o solo (Singh e Ryan, 2015), garantindo um sistema produtivo durante anos. Porém, quando não manejadas, as pastagens extensivas apresentam desafios para a sustentabilidade e saúde do solo, resultando em um balanço negativo entre a deposição de matéria orgânica e a remoção de nutrientes ao longo do tempo.

O solo de pastagens mal manejadas apresenta desequilíbrio das relações bioquímicas, com redução da estabilidade do carbono no solo, rápida mineralização da matéria orgânica, e aumento das emissões de CO₂ para a atmosfera (Martin et al., 2020). O monocultivo de forrageiras também pode comprometer a retenção e a ciclagem do nitrogênio. Em sistemas de baixa produtividade e com baixa presença de raízes a lixiviação de nitrato se torna um problema significativo, especialmente em solos com baixa capacidade de retenção de nutrientes (Pan et al., 2024). Somado a isso, o uso inadequado ou excessivo de fertilizantes nitrogenados no intuito de potencializar a produção forrageira pode resultar na lixiviação do nitrato e emissões elevadas de óxido nitroso, contribuindo para impactos ambientais significativos (Cameron et al., 2013).

A comparação entre os diferentes usos do solo mostra que ambos os sistemas, quando recebem manejo adequado, podem proporcionar a aumento dos estoques de carbono e nitrogênio do solo. Contudo, a produção agropecuária tem buscado além da sustentabilidade, a maior produtividade por área. Em diversas regiões do Brasil as pastagens plantadas com apenas uma espécie forrageira passam por um período de

sazonalidade da produção em decorrência das condições climáticas limitadas, como ausência de chuva, baixas temperaturas, e dias mais curtos. Durante esse período a gramínea passa por senescência, caracterizando um período improdutivo, com menor renovação e deposição de biomassa aérea e radicular no solo, menor atividade biológica e menor taxa de liberação de nutrientes, além de maior suscetibilidade à degradação do solo por exposição a chuvas e vento. Nesse aspecto, os sistemas integrados apresentam uma vantagem pois permitem a produção de uma cultura agrícola no momento de transição entre o período de águas e seca, chamada safrinha, e proporciona uma pastagem vigorosa mesmo em períodos de condições climáticas adversas.

No Brasil, um dos arranjos amplamente utilizados em sistemas integrados é a sucessão de culturas que combina a produção de grãos ou culturas anuais com a formação de pastagens. Esse modelo geralmente consiste no cultivo de soja durante o período de maior disponibilidade hídrica, luminosidade e temperaturas favoráveis, garantindo altos rendimentos dessa cultura. Após a colheita da soja, é implantada uma segunda cultura de grãos, selecionada com base em sua capacidade de se desenvolver sob condições de menor oferta de água e luz. Essa cultura é frequentemente consorciada com uma gramínea forrageira, como *Urochloa spp.* ou *Megathyrsus spp.*, permitindo a formação de pastagem para o período subsequente (Dias et al., 2020).

A relação entre solo e gramínea não se restringe apenas à produtividade das pastagens, mas também influencia o desempenho animal. Solos ricos em matéria orgânica, bem estruturados e com adequada retenção de umidade favorecem a absorção eficiente de nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, elementos fundamentais para a composição química das forrageiras (Sultanbawa e Sultanbawa, 2023). A nutrição adequada da planta impacta diretamente a concentração de proteína bruta, a digestibilidade e a proporção de fibra na gramínea, fatores que afetam a eficiência alimentar dos animais e a produtividade pecuária.

2.4 Relação entre qualidade do solo e valor nutritivo das gramíneas

A qualidade do solo é um dos principais fatores que afetam a composição nutricional das forrageiras utilizadas na alimentação animal. A disponibilidade de nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo, enxofre e micronutrientes, tem impacto direto na produtividade, no teor de proteína bruta, na digestibilidade e no valor nutritivo das gramíneas (Chand et al., 2022). Nos sistemas agropecuários a relação entre a fertilidade do solo e a qualidade da forragem é fundamental para garantir o ganho de peso animal.

A relação entre o solo e a qualidade das gramíneas está ligada à disponibilidade e à ciclagem dos nutrientes. As forrageiras tropicais apresentam grande capacidade de adaptação a diferentes condições edafoclimáticas, no entanto, a composição química dessas gramíneas pode variar significativamente em função do manejo do solo, do aporte de matéria orgânica e da disponibilidade de nutrientes (Moore et al., 2020).

Entre os nutrientes essenciais o nitrogênio é um dos mais influentes, pois participa da síntese de proteínas através da polimerização de aminoácidos, participa da fotossíntese, da formação de compostos estruturais das plantas, e da síntese de hormônios como auxinas e citocininas, e giberelinas, que regulam o crescimento e desenvolvimento das plantas (Liu et al., 2016; Luo et al., 2020). O fósforo (P) está envolvido na fotossíntese e na transferência de energia dentro das células vegetais, o potássio (K) afeta a resistência da planta ao estresse, e o cálcio (Ca) e magnésio (Mg) influenciam a estrutura celular e a fotossíntese, o enxofre (S) é essencial para a síntese de aminoácidos impactando a qualidade da proteína, e cada microelemento do solo contribui para a qualidade da forrageira (Whitehead, 2000)

Em sistemas como o ILP, que apresentam maior eficiência na retenção e na disponibilidade de nutrientes, é possível encontrar maior valor nutritivo da forragem em decorrência da maior fertilidade do solo (Kebede et al., 2016). E o oposto acontece em pastagens degradadas.

As gramíneas apresentam variações na composição química dependendo do manejo adotado na planta. O momento do corte ou do pastejo também influencia o valor nutritivo. Plantas mais jovens apresentam maior digestibilidade e maior concentração de proteína, enquanto plantas mais maduras acumulam mais lignina e fibra, reduzindo seu valor nutritivo (Fernandes et al., 2004). O manejo da pastagem

respeitando a altura de entrada e saída dos animais, a capacidade de suporte da pastagem, e o momento ideal para corte pode otimizar a oferta de forragem de melhor qualidade ao longo do ciclo produtivo.

A sustentabilidade da produção pecuária depende da interação entre qualidade do solo, disponibilidade de nutrientes e valor nutritivo das pastagens. Em sistemas bem manejados, a ciclagem eficiente de carbono e nitrogênio no solo favorece a produtividade das gramíneas e melhora a conversão alimentar dos animais. O manejo inadequado, por outro lado, pode comprometer a fertilidade do solo e reduzir a oferta de forragem de alta qualidade. A adoção de práticas agrícolas conservacionistas, como a rotação de culturas, a introdução de leguminosas nas pastagens e o uso de adubação verde, contribui para a manutenção do equilíbrio entre produção e conservação dos recursos naturais. Além disso, a diversificação dos sistemas produtivos, como ocorre no ILP, permite otimizar o uso dos nutrientes e reduzir impactos ambientais, tornando a pecuária mais eficiente e sustentável.

Dessa forma, compreender a relação entre a dinâmica da matéria orgânica e a qualidade nutricional das forrageiras é essencial para aprimorar as estratégias de manejo e promover a sustentabilidade dos sistemas agropecuários.

3 REFERÊNCIAS

Amado, T. J. C., Bayer, C., Conceição, P. C., Spagnollo, E., de Campos, B. C., da Veiga, M. (2006). Potential of Carbon Accumulation in No-Till Soils with Intensive Use and Cover Crops in Southern Brazil. **Journal of Environmental Quality**, 35(4), 1599–1607. <https://doi.org/10.2134/jeq2005.0233>

Ayiti, O. E., Babalola, O. O. (2022). Factors Influencing Soil Nitrification Process and the Effect on Environment and Health. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, 6, 821994. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.821994>

Baggs, E.M., Watson, C.A., Rees, R.M (2000) The fate of nitrogen from incorporated cover crop and green manure residues. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 56, 153–163. <https://doi.org/10.1023/A:1009825606341>

Bayer, C., Mielniczuk, J., Martin-Neto, L. (2000). Effect of tillage and cropping systems on soil organic matter dynamics and atmospheric CO₂ mitigation in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, 24(3), 599-607. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000300013>

Blair, G.J., Lefroy, R. D.B., Lisle, L., 1995. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**. 46, 1459-1466. <https://doi.org/10.1071/AR9951459>

Bogunovic, I., Kljak, K., Dugan, I., Grbeša, D., Telak, L. J., Duvnjak, M., Kisic, I., Solomun, M. K., Pereira, P. (2022). Grassland Management Impact on Soil Degradation and Herbage Nutritional Value in a Temperate Humid Environment. **Agriculture**, 12(7), 12070921. <https://doi.org/10.3390/agriculture12070921>.

Cameron, K. C., Di, H. J., Moir, J. L. (2013). Nitrogen losses from the soil/plant system: A review. **Annals of Applied Biology**, 162(2), 145–173. <https://doi.org/10.1111/aab.12014>

Chand, S., Indu, Singhal, R. K., Govindasamy, P. (2022). Agronomical and breeding approaches to improve the nutritional status of forage crops for better livestock productivity. **Grass and Forage Science**, 77 (1), 11–32. <https://doi.org/10.1111/gfs.12557>

Chataut, G., Bhatta, B., Joshi, D., Subedi, K., Kafle, K. (2023). Greenhouse gases emission from agricultural soil: A review. **Journal of Agriculture and Food Research**, 11, 100533. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100533>

Coskun, D., Britto, D. T., Shi, W., Kronzucker, H. J. (2017). Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition. **Nature Plants**, 3, 17074. <https://doi.org/10.1038/nplants.2017.74>.

Dias, M. B. C, Costa K. A. P, Severiano E. C., Bilego, U. O., Furtini Neto, A. E., Almeida, D. P., Brand, S. C., Vilela, L. (2020). *Brachiaria* and *Panicum maximum* in an integrated crop–livestock system and a second-crop maize system in succession with soybean. **The Journal of Agricultural Science**, 158(3), 206-217. doi:10.1017/S0021859620000532

Fageria, N. K. (2012). Role of Soil Organic Matter in Maintaining Sustainability of Cropping Systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 43(16), 2063–2113. <https://doi.org/10.1080/00103624.2012.697234>

Fernandes, F. D., Martha Junior, G. B., Ramos, A. K. B., Jank, L., Vilela, L., Karia, C. T. Andrade, R. P. Faleiro, G. G. (2004). Valor nutritivo de acessos de *Panicum maximum* jacq. no cerrado do Distrito Federal. Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados**. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/568314>. Acesso em: 12 fev. 2025.

Govindasamy, P., Muthusamy, S. K., Bagavathiannan, M., Mowrer, J., Jagannadham, P. T. K., Maity, A., Halli, H. M., G. K, S., Vadivel, R., T. K, D., Raj, R., Pooniya, V., Babu, S., Rathore, S. S., L, M., Tiwari, G. (2023). Nitrogen use efficiency—a key to enhance

crop productivity under a changing climate. **Frontiers in Plant Science**, 14, 1121073. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1121073>

Grzyb, A., Wolna-Maruwka, A., Niewiadomska, A. (2021). The significance of microbial transformation of nitrogen compounds in the light of integrated crop management. **Agronomy**, 11(7), 1415. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071415>

Guillaume, T., Bragazza, L., Levasseur, C., Libohova, Z., Sinaj, S. (2021). Long-term soil organic carbon dynamics in temperate cropland-grassland systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 305, 1071. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107184>

Guo, L. B., Gifford, R. M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: A meta-analysis. **Global Change Biology**, 8(4), 345–360. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>

Husein, H. H., Lucke, B., Bäuml, R., Sahwan, W. (2021). A contribution to soil fertility assessment for arid and semi-arid lands. **Soil Systems**, 5(3), 42. <https://doi.org/10.3390/soilsystems5030042>

Hussain, S., Hussain, S., Guo, R., Sarwar, M., Ren, X., Krstic, D., Aslam, Z., Zulifqar, U., Rauf, A., Hano, C., El-esawi, M. A. (2021). Carbon sequestration to avoid soil degradation: A review on the role of conservation tillage. **Plants**, 10(10), 12-16. <https://doi.org/10.3390/plants10102001>

Kebede, E. (2021). Contribution, utilization, and improvement of legumes-driven biological nitrogen fixation in agricultural systems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, 5, 767998. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.767998>

Kebede, G., Assefa, G., Feyissa, F., Mengistu, A. (2016). Forage Legumes in Crop-Livestock Mixed Farming Systems - A Review. **International Journal of Livestock Research**, 6(4), 1-18. <https://doi.org/10.5455/ijlr.20160317124049>

Khatoon, H., Solanki, P., Narayan, M., Tewari, L., Rai, J., Hina Khatoon, C. (2017). Role of microbes in organic carbon decomposition and maintenance of soil ecosystem. **International Journal of Chemical Studies**, 5(6), 1648–1656.

Lal, R. (2005). Forest soils and carbon sequestration. **Forest Ecology and Management**, 220(1–3), 242–258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>

Lehmann, J., Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, 528, 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>

Lemaire, G., Franzluebbers, A., Carvalho, P. C. de F., Dedieu, B. (2014). Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 190, 4–8. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>

Liu, J., Wu, N., Wang, H., Sun, J., Peng, B., Jiang, P., Bai, E. (2016). Nitrogen addition affects chemical compositions of plant tissues, litter and soil organic matter. **Ecology**, 97(7), 1796–1806. <https://doi.org/10.1890/15-1683.1>

Luo, L., Zhang, Y., Xu, G. (2020). How does nitrogen shape plant architecture? **Journal of Experimental Botany**, 71(15), 4415–4427. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa187>

Machebe, N.S., Ikeh, N.E., Uzochukwu, I.E., Baiyeri, P.K. (2023). Livestock-crop interaction for sustainability of agriculture and environment. **Sustainable agriculture and the environment**, 13, 339-394, 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-90500-8.00011-7>.

Martin, G., Durand, J. L., Duru, M., Gastal, F., Julier, B., Litrico, I., Louarn, G., Médiène, S., Moreau, D., Valentin-Morison, M., Novak, et al. (2020). Role of ley pastures in tomorrow's cropping system: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, 40(17), 1-25. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00620-9>

Merante, P., Dibari, C., Ferrise, R., Sánchez, B., Iglesias, A., Lesschen, J. P., Kuikman, P., Yeluripati, J., Smith, P., Bindi, M. (2017). Adopting soil organic carbon management practices in soils of varying quality: Implications and perspectives in Europe. **Soil and Tillage Research**, 165, 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.001>

Moore, K. J., Curtiss, C. F., Lenssen, A. W., Fales, S. L. (2020). Factors Affecting Forage Quality. *In: Forages: The Science of Grassland Agriculture*, 2, 701-717. <https://doi.org/10.1002/9781119436669.ch39>

Osman, K. T. (2013). Soil Organic Matter. *In: Soils, principles, properties and management*, 89–96. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2_7

Pan, Y., She, D., Ding, J., Abulaiti, A., Zhao, J., Wang, Y., Liu, R., Wang, F., Shan, J., Xia, Y. (2024). Coping with groundwater pollution in high-nitrate leaching areas: The efficacy of denitrification. **Environmental Research**, 250, 118484. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118484>

Pillon, C. N., Mielniczuk, J., Martin Neto, L. (2002). Dinâmica da Matéria Orgânica no Ambiente. Embrapa, **Documentos (105)**, 41p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/744147/1/documento105.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2025.

Poirier, V., Roumet, C., Munson, A. D. (2018). The root of the matter: Linking root traits and soil organic matter stabilization processes. **Soil Biology and Biochemistry**, 120, 246–259. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.02.016>

Pribyl, D. W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. **Geoderma**, 156(3–4), 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>

- Purwanto, B. H., Alam, S. (2020). Impact of intensive agricultural management on carbon and nitrogen dynamics in the humid tropics. **Soil Science and Plant Nutrition**, 66(1), 50–59. <https://doi.org/10.1080/00380768.2019.1705182>
- Rakkar, M. K., Blanco-Canqui, H. (2018). Grazing of crop residues: Impacts on soils and crop production. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 258, 71–90. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.018>.
- Robertson, G.P.; Groffman, P.M. (2015). Nitrogen Transformations. **Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry**, 421-446. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-415955-6.00014-1>.
- Santos, J. V., Bento, L. R., Bresolin, J. D., Mitsuyuki, M. C., Oliveira, P. P. A., Pezzopane, J. R. M., Bernardi, A. C. C., Mendes, I. C., Martin-Neto, L. (2022). The long-term effects of intensive grazing and silvopastoral systems on soil physicochemical properties, enzymatic activity, and microbial biomass. **Catena**, 219, 106619. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106619>
- Sapkota, S., Ghimire, R., Angadi, S. V. (2024). Regulation of surface and sub-surface soil organic carbon sequestration in water-limited landscapes with integration of circular perennial grass buffer strips. **Applied Soil Ecology**, 202, 105551. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105551>
- Sheldrick, W., Syers, J. K., Lingard, J. (2003). Contribution of livestock excreta to nutrient balances. *In: Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 66, 119-131. <https://doi.org/10.1023/A:1023944131188>
- Singh, B., Ryan, J. (2015). Managing Fertilizers to Enhance Soil Health. **International Fertilizer Industry Association (IFA)**. Paris. France.
- Smith, P., Cotrufo, M. F., Rumpel, C., Paustian, K., Kuikman, P. J., Elliott, J. A., McDowell, R., Griffiths, R. I., Asakawa, S., Bustamante, M., et al. (2015). Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. **Soil**, 1(2), 665–685. <https://doi.org/10.5194/soil-1-665-2015>
- Sultanbawa, F., Sultanbawa, Y., (2023) Mineral nutrient-rich plants – Do they occur?. **Applied Food Research**, 3(2), 100347. <http://dx.doi.org/10.1016/j.afres.2023.100347>.
- Tyagi, J., Ahmad, S., Malik, M. (2022). Nitrogenous fertilizers: impact on environment sustainability, mitigation strategies, and challenges. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 19, 11649–11672 <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04027-9>
- Wander, M. (2004). Soil Organic Matter Fractions and Their Relevance to Soil Function. *In: Magdoff, F. Weil, R. (Eds.), Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture*, 1, 67-102. <https://doi.org/10.1201/9780203496374.ch3>

Whitehead, D. C. (2000). Nutrient elements in grassland: soil-plant-animal relationships, 300p, **CABI** Pub. <https://doi.org/10.1079/9780851994376.000>.

Xu, S., Sheng, C., Tian, C. (2020). Changing soil carbon: Influencing factors, sequestration strategy and research direction. **Carbon Balance and Management**, 15(2), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s13021-020-0137-5>.

CAPÍTULO 2 – Dinâmica de carbono no solo e ciclagem de nitrogênio sob diferentes estratégias de gerenciamento de pastagens.

Resumo - Este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da intensificação no uso de pastagem e da conversão de pastagem perene em sistema integrado sob a saúde e estrutura do solo, ciclagem de nitrogênio, e o impacto do manejo desses sistemas sob a atividade microbiana. Nos baseamos na hipótese que a intensificação sustentável de pastagem através de sistemas integrados entre culturas anuais e gramíneas promove maiores benefícios ecossistêmicos e produtividade da pastagem a curto prazo. O estudo foi desenvolvido durante dois anos experimentais, avaliando três sistemas de uso da terra – pastagem em monocultivo (PM), sistema integrado lavoura-pecuária (ILP) e vegetação nativa (VN). Foram realizadas coletas de solo em todos os sistemas durante três tempos experimentais para análise de fertilidade, concentração de carbono orgânico total, frações lábil e solúvel de carbono, concentração de nitrogênio total e frações inorgânicas de nitrato e amônio, além da emissão de $\text{CO}_2\text{-C}$. Também foram utilizados índices calculados para determinar a qualidade do solo, além de coleta de raízes e densidade aparente do solo. Os dados foram avaliados quanto à normalidade e homoscedasticidade, foi aplicada ANOVA para cada ano experimental, e o teste Tukey para comparação de médias utilizando o software R. Os resultados indicaram que o solo de vegetação nativa apresentou maior estabilidade, atuando como um sistema de referência. O sistema ILP apresentou maior variação da concentração de carbono, e ao final de dois anos agrícolas não encontramos diferença da concentração de carbono orgânico total entre esse sistema e o sistema VN. A implantação de ILP e recuperação de PM promoveram aumento das frações lábeis de carbono, superando as concentrações encontradas no solo de floresta. O sistema ILP apresentou maior eficiência na conversão de nitrogênio orgânico em inorgânico, ao tempo que promoveu menor emissão de $\text{CO}_2\text{-C}$ por atividade microbiana. Embora os sistemas integrados promovam maiores serviços ecossistêmicos, e as pastagens manejadas possam promover aumento da concentração de carbono no solo e melhorar a ciclagem do nitrogênio, a qualidade do carbono retido ainda não se equipara à encontrada em áreas de vegetação nativa, ressaltando a necessidade de práticas de manejo que favoreçam a estabilização do carbono e a retenção de nutrientes para a sustentabilidade do ecossistema.

Palavras-chave: carbono no solo, ciclagem de nutrientes, sistema integrado

CHAPTER 2 – Soil carbon dynamics and nitrogen cycling under different pasture management strategies

ABSTRACT – This study aimed to evaluate the effects of pasture recovery and the conversion of perennial pasture into an integrated system on soil health and structure, nitrogen cycling, and the impact of system management on microbial activity. The study is based on the hypothesis that sustainable pasture intensification through integrated systems combining annual crops and grasses is more efficient to improve the soil quality in a short term. Soil samples were collected over two experimental years from three land-use systems – pasture monoculture (PM), integrated crop-livestock system (ILP), and native vegetation (VN) – during three experimental periods. Analyses included soil fertility, total organic carbon concentration and labile, soluble, particulate, and mineral-associated carbon, total nitrogen and inorganic fractions of nitrate and ammonium, as well as CO₂-C emission. Data was assessed for normality and homoscedasticity, and statistical analysis was performed using ANOVA and Tukey test to compare averages using R software. Soil quality indices, root sampling, and soil density measurements were also employed. The results indicated that soil under native vegetation exhibited superior quality and structural stability, serving as a reference. The ILP system showed greater variation in carbon concentration, and after two agricultural years, no significant difference was found in total organic carbon between ILP and VN. The implementation of ILP and the recovery of PM promoted an increase in labile carbon fractions, surpassing those found in forest soil. Furthermore, the ILP system demonstrated higher efficiency in converting organic nitrogen into inorganic forms, while exhibiting lower CO₂-C emissions due to microbial activity. Although integrated systems enhance ecosystem services and managed pastures can increase soil carbon concentration and improve nitrogen cycling, the quality of the retained carbon remains inferior to that of native vegetation, underscoring the need for management practices that favor carbon stabilization and nutrient retention for ecosystem sustainability.

Keywords: integrated system, nutrient cycling, soil carbon.

1 INTRODUÇÃO

As pastagens são extensos ecossistemas que cobrem aproximadamente 11% da superfície da Terra, sendo sistemas fundamentais no ciclo global de carbono, nitrogênio, na conservação da biodiversidade e na produção de alimentos (Conant et al., 2017; FAO, 2021). As pastagens fornecem serviços ecossistêmicos essenciais, incluindo sequestro de carbono do solo, retenção de água e ciclagem de nutrientes, que são fundamentais para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e regulação climática (Lal, 2018). No entanto, a intensificação do uso da terra, principalmente a conversão da vegetação nativa em pastagens de monocultura e sistemas convencionais de cultivo, pode levar a perdas significativas de carbono, degradação do solo, e redução da disponibilidade de nutrientes, comprometendo a produtividade a longo prazo e aumentando as emissões de gases de efeito estufa (Smith et al., 2020)

O carbono orgânico total do solo (COT) é um componente determinante para fertilidade e sustentabilidade de sistemas de produção, influenciando a retenção de nutrientes, a atividade microbiana, e a estrutura do solo (Lehmann e Kleber, 2015). A capacidade de um ecossistema em armazenar carbono depende da estabilização e distribuição do COT em diferentes reservas, incluindo frações lábeis, solúveis, particuladas e associadas a minerais, cada uma com diferentes graus de renovação e estabilidade (Six et al., 2002). O carbono lábil (CL) é uma fração com alta disponibilidade, e quando transformado pela microbiota do solo libera carbono orgânico solúvel em água (COSA), um composto de moléculas formado por carboidratos, sacarídeos, ácidos orgânicos e uma pequena fração de ácidos fúlvicos, que também são excretados pela biomassa radicular, e são rapidamente absorvidos e metabolizados por células microbianas (Singh et al., 2021). O equilíbrio entre as entradas de C por meio da biomassa radicular, necromassa microbiana, serapilheira ou matéria orgânica, a transformação da matéria orgânica em frações de C, e as saídas de C por emissão de CO₂ devido a respiração microbiana determina se um sistema funciona como um sumidouro ou fonte de carbono (Franzluebbers et al., 2014).

O volume de raízes presentes no solo também é um forte contribuinte para a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) em pastagens. As raízes liberam

exsudatos radiculares, compostos principalmente por carboidratos e ácidos orgânicos que são degradados e metabolizados em açúcares simples e aminoácidos pelos microrganismos do solo, atuando como fonte de carbono orgânico solúvel em água, prontamente disponível para a microbiota (Whalen et al., 2014). A biomassa vegetal e a renovação radicular influenciam o acúmulo de matéria orgânica e a agregação do solo, contribuindo para a recuperação do solo a longo prazo e a resiliência da pastagem (Wang et al., 2020). No entanto, as mudanças no uso da terra e as práticas de manejo podem afetar significativamente a distribuição das raízes, a penetração em profundidade e as taxas de decomposição (Frasier et al., 2019), afetando a capacidade do solo de reter carbono e nitrogênio.

A ciclagem do nitrogênio é um aspecto da funcionalidade do solo que afeta a produtividade das plantas, a biomassa microbiana e a resiliência geral do ecossistema (Nizamani et al., 2024). A disponibilidade de nitrogênio no solo pode ser medida por meio de amônio e nitrato (Pilbeam, 2015) e as perdas de nitrogênio por lixiviação, volatilização e desnitrificação podem ser exacerbadas por práticas de manejo inadequadas, levando a declínios de amônio e nitrato, afetando a fertilidade do solo e aumentando os impactos ambientais. Estratégias como sistemas integrados com lavoura e pecuária (ILP) têm sido sugeridas como alternativas viáveis para aumentar a retenção e a ciclagem de nitrogênio, melhorando a qualidade do solo e da forragem em ecossistemas de pastagens (Lemaire et al., 2014).

No Brasil, onde as pastagens cobrem mais de 170 milhões de hectares e são um componente dominante da produção pecuária (Mapbiomas, 2025), a sustentabilidade da produção depende cada vez mais de estratégias de restauração do solo e sequestro de carbono. Embora as pastagens de monocultura sejam amplamente utilizadas e possuam potencial de prestar serviços ecossistêmicos quando bem manejadas, esses sistemas são mais suscetíveis ao esgotamento de nutrientes, compactação do solo e declínio da produtividade (Dias Filho, 2023). Em contraste, os sistemas de integração lavoura-pecuária surgiram como uma alternativa para aumentar a matéria orgânica do solo, através do cultivo simultâneo ou alternado entre culturas anuais e pastagem, promovendo maior deposição de matéria orgânica, diversidade microbiana e maior ciclagem de nutrientes (Carvalho et al., 2010).

Sistemas de pastagem geralmente são áreas resultantes da conversão de áreas florestais, e áreas de vegetação nativa representam uma referência básica de ecossistemas não perturbados (Blair, 1995), desempenhando um papel crítico na manutenção dos estoques de carbono do solo, disponibilidade de nitrogênio, desenvolvimento radicular e atividade biológica. Portanto, as práticas de manejo que aproximam as características do solo gerenciado às características dos solos de referência fornecem informações importantes sobre o potencial de restauração e o manejo sustentável da terra.

Este estudo tem como objetivo avaliar a dinâmica do carbono e do nitrogênio do solo em três sistemas distintos de uso da terra: pastagem em monocultivo, sistema de integração lavoura-pecuária, e vegetação nativa. Nossa hipótese é sustentada pelo pressuposto que sistemas integrados podem fornecer maiores quantidades e qualidade de carbono para o solo otimizando a ciclagem de nutrientes em um menor período de tempo. Avaliamos as mudanças no carbono orgânico do solo (matéria orgânica, fração total de carbono, C lábil, C solúvel em água, carbono particulado e associada a minerais), disponibilidade de nitrogênio (nitrogênio total, amônio, nitrato) e emissão de CO₂-C pela microbiota. Investigamos as mudanças na biomassa radicular em decorrência da implantação de sistemas integrados ou recuperação de pastagem de longo termo, analisando o papel do manejo dos sistemas de produção na melhoria da estrutura do solo, estabilização de carbono e retenção de nutrientes. Nossas descobertas fornecerão informações sobre o impacto desses sistemas na promoção da restauração do solo, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias que conciliem a produção pecuária com a conservação ambiental.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O experimento foi conduzido durante dois anos experimentais (2021 a 2023) no setor de forragicultura e pastagem da Universidade Estadual Paulista Júlio De Mesquita Filho, Jaboticabal, Brasil (21°14'05"S, 48°17'09"W). O clima da área experimental é classificado como úmido subtropical, com verões úmidos e invernos

secos. A precipitação média anual é de 1424 mm, a temperatura média do ar é de 22,3 °C, e o solo é classificado como Latossolo vermelho, apresentando 48% de argila, 12% de silte, e 40% de areia. A área experimental fica próximo a uma área de floresta nativa (FN), e o solo desse ambiente foi utilizado como referência. A área experimental foi implantada em uma pastagem plantada há 20 anos que recebia baixo manejo. Parte da pastagem foi transformada em sistema de integração lavoura pecuária (ILP), e outra parte foi mantida com pastagem em monocultivo (PM). A descrição do manejo das áreas experimentais são ilustradas na Figura 1.

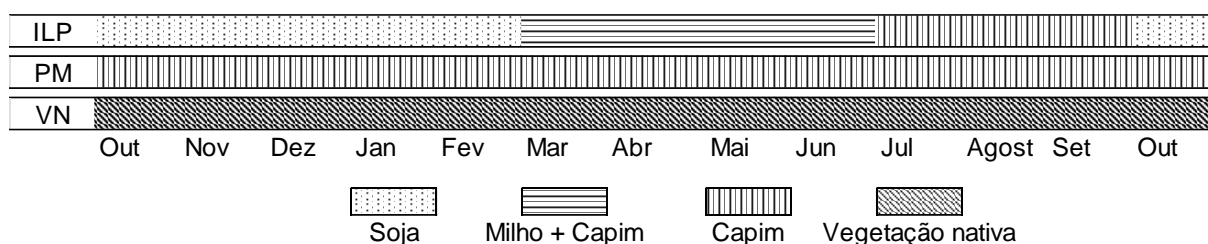


Figura 1. Esquemática das áreas experimentais dentro do período de um ano.

A pastagem em monocultivo era formada por *Urochloa brizanta* cv. Marandu, sob pastejo em lotação intermitente com altura de entrada dos animais quando o dossel atingia 30 cm de altura, e 15 cm de altura pós-pastejo. A área com PM recebeu calagem de acordo com a análise de solo, e aplicação de nitrogênio na forma de ureia na dose equivalente a 150 kg ha⁻¹ ano⁻¹, fracionado em 3 aplicações durante o período das águas. A estratégia de adubação foi repetida durante os dois anos experimentais. Ao início do experimento e final de cada ano experimental o solo de todas as três áreas experimentais foi avaliado quanto à fertilidade (Tabela 1).

A gramínea presente na área destinada a ILP foi dessecada quimicamente, e o sistema foi inicialmente conduzido com a semeadura de soja variedade precoce com ciclo completo de 110 dias. Após a colheita da soja a área recebeu milho + capim marandu, restando apenas o capim após a colheita do milho. O ciclo de cultivo se repetiu por mais 1 ano, com a gramínea sendo dessecada para o plantio da soja no início do período das águas subsequente. Em todos os cultivos foi utilizada o método de plantio direto com arranjo de semeadura e adubação específicas para as culturas da soja e milho safrinha seguindo o boletim de recomendações para o estado de São Paulo.

Tabela 1. Análise química do solo, na profundidade de 0 a 20 cm, nos dois anos de avaliação.

Variáveis	Unidade	Uso da terra				VN
		ILP	PM	ILP	PM	
		1° Ano		2° Ano		
pH (CaCl ₂)		4,9	5,1	5,2	5,1	6,0
M.O.	g dm ⁻³	35	32	34	39	29
P	mg dm ⁻³	13	11	10	11	11
S	mg dm ⁻³	12	10	9	9	8
Ca	mmolc dm ⁻³	23	26	29	29	44
Mg	mmolc dm ⁻³	10	14	11	14	16
Na	mmolc dm ⁻³	ns	ns	ns	ns	ns
K	mmolc dm ⁻³	4,4	3,7	6	4,6	7,0
Al	mmolc dm ⁻³	0	0	0	0	0
H+Al	mmolc dm ⁻³	41	42	27	25	16
SB	mmolc dm ⁻³	37,4	43,8	45,7	47,0	77
CTC	mmolc dm ⁻³	78,0	86,1	72,6	71,8	93
Sat. Bases		48	51	63	66	83
Sat. Al		0	0	0	0	0

ILP: Integração lavoura-pecuária; PM: Pastagem em monocultivo; VN: Vegetação nativa; M.O: Matéria orgânica; P: Fósforo; S: Enxofre; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; Na: Sódio; K: Potássio; Al: Alumínio; H: hidrogênio; SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de troca catiônica; Sat.: Saturação.

2.2 Coleta de solo e raízes

Para avaliação da dinâmica do carbono foram abertas cinco trincheiras com 30 cm de profundidade, onde amostras de solo deformadas e não deformadas foram coletadas em quatro profundidades diferentes: 0–5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20 a 30 cm durante três tempos amostrais: Antes da implantação dos sistemas (T0), após 1 ano do ciclo agrícola (T1) e após 2 anos do ciclo agrícola (T2). As coletadas de solo não deformadas foram realizada com anéis de Koppeck, a fim de para avaliar a densidade aparente do solo. As amostras deformadas foram secas ao ar durante quinze dias, e peneiradas a 2 mm para posterior avaliação das variáveis de carbono.

As raízes foram coletadas através da abertura de trincheiras de 30x15 cm nos tempos T1, T2 e T3, onde o solo foi removido e lavado sob peneira de 2mm. As raízes foram secas em estufa de circulação forçada a 55°C e pesadas para obtenção de matéria seca da raiz.

A coleta de solo para análise de nitrogênio foi realizada nos três sistemas no mesmo momento, e em três tempos: antes da implantação do experimento (T0), após

o primeiro ciclo da soja (T1) e após o segundo ciclo da soja (T2). As coletas foram realizadas com auxílio de trado de coleta de solo a 0-20 cm a fim de avaliar a disponibilidade de nitrogênio total, amônio e nitrato para o pasto.

2.3 Análises químico-físicas

As amostras de solo foram enviadas para análise de parâmetros de fertilidade e características físicas ao laboratório Athenas Paulista certificado com ISO9001.

A quantificação do carbono orgânico total foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Yeomans e Bremner (1988) e adaptada por Mendonça e Matos (2005), através da digestão de amostras de solo em dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7 - 0,167 \text{ Mol}^{-1}$). O carbono orgânico lábil (COL) foi quantificado de acordo com Blair et al. (1995), que foi adaptado aos solos tropicais por Shang e Tiessen (1997), usando solução de permanganato de potássio ($KMnO_4 - 0,033 \text{ mol L}^{-1}$), como oxidante de carbono. O carbono orgânico solúvel em água (COSA) foi analisado usando o método proposto por Bartlett e Ross (1988), estimando a quantidade de C presente na solução através da perda de cor, quando o manganês é reduzido pelo carbono orgânico na presença de H_2SO_4 .

A concentração total de nitrogênio do solo foi quantificada através de um analisador CHNS (Vario Micro -Cube, Elementartar) com método de combustão a seco (Bisutti et al., 2004). As frações minerais de N foram extraídas usando solução de KCl de 2 m e a concentração de amônio foi determinada por análise colorimétrica através da reação de Berthelot (Foster, 1995), enquanto a concentração de nitrato foi medida usando redução com cloreto de vanádio (III) (Doane e Horwáth, 2003).

2.3 Atividade biológica do solo

O teste de atividade biológica do solo e mineralização do carbono foi acessado através da metodologia de Franzurbens (2018). As amostras de solo foram reidratadas a 50% de espaço poroso preenchido com água e incubadas em estufa a 25°C. A emissão de CO_2-C foi avaliada usando NaOH para capturar CO_2 . A atividade biológica

do solo foi acessada pela emissão de CO₂ após 3 dias de incubação e a quantidade de C mineralizado foi quantificado seguindo a equação 1:

$$C_{day} (mg\ kg^{-1}\ soil) = \frac{(mL_{branco} - mL_{amostra}) \times mol\ L^{-1}\ HCL \times 6 \times 1000}{(g\ solo)} \quad (Eq. 1)$$

2.4 Cálculo de estoque de carbono e índice de manejo do carbono

O estoque de carbono foi estimado considerando a massa equivalente do solo, segundo Sisti et al. (2004), uma vez que o tráfego de maquinários e animais pode resultar em maior volume de massa de solo por unidade de área, superestimando o estoque de carbono. O cálculo do estoque de carbono foi realizado seguindo a equação 1:

$$E_{corrigido,f} = \sum_{i=1}^{n-1} E_i + [M_f - (\sum_{i=1}^{n-1} M_i - \sum_{i=1}^{n-1} M_{ref})] \times C_f \times 10^{-3} \quad (1)$$

Onde: $E_{corrigido,f}$ é o estoque corrigido de C até a profundidade f (Mg ha⁻¹); $\sum_{i=1}^{n-1} E_i$ representa a soma do estoque de C das camadas superiores; M_f é a massa de solo da última camada analisada (20-30 cm); $\sum_{i=1}^{n-1} M_i$ representa a soma da massa do solo nas camadas superiores; $\sum_{i=1}^{n-1} M_{ref}$ é a soma da massa de solo na profundidade equivalente no sistema de referência; C_f é a concentração de C na última camada analisada.

Após a correção, o estoque total de C no solo foi obtido pela Equação 2:

$$E_{total,f} = \sum_{i=1}^{n-1} E_i + E_{corrigido,f} \quad (2)$$

O índice de manejo de carbono (IMC) foi calculado seguindo a Equação 3 para cada sistema e cada profundidade, segundo Blair et al. (1995), considerando o NF como referência (IMC = 100).

$$CMI = CPI \times LI \times 100 \quad (3)$$

Onde CPI é o C total da amostra dividido pelo C total de referência; LI é a labilidade de C no solo da amostra dividida pela labilidade de C no solo de referência. A labilidade foi calculada como o carbono lábil dividido pelo carbono não lábil.

2.5 Análise estatística

Submetemos os dados ao teste de normalidade e homoscedasticidade utilizando o teste de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente, implementado com os pacotes “rstatix” e “car” do software R. Os dados de densidade de raízes, estoque de carbono e índice de manejo do carbono foram analisados através de ANOVA para diferença entre médias, e aplicado o teste Tukey-HSD quando encontradas diferenças significativas ($p < 0,05$). Os tratamentos foram considerados efeitos fixos, e o tempo variável.

3 RESULTADOS

3.1 Densidade do solo

A densidade do solo variou significativamente entre os sistemas de uso da terra nos tempos avaliados (Figura 2). Em T0 e T1, foram observadas diferenças na densidade do solo entre os sistemas ILP e PM somente na camada de 0-5cm ($p < 0,05$), e durante estes dois tempos a densidade no sistema PM não se equiparou à VN ($p < 0,05$).

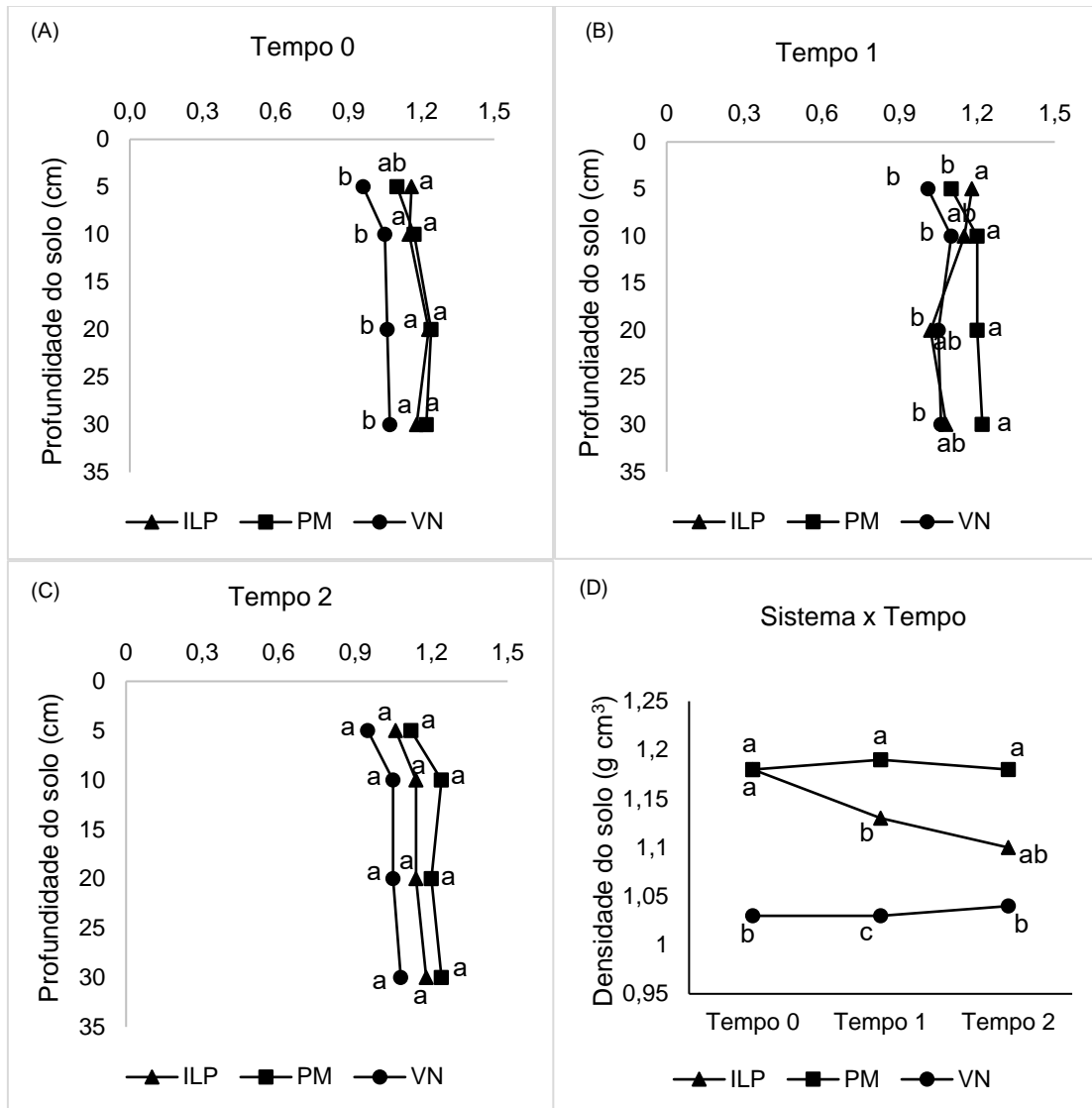


Figura 2. Densidade do solo avaliada a cada tempo experimental e associando sistema x tempo. (A) Tempo 0: Antes da implantação dos sistemas; (B) tempo 1: após 1 ano do ciclo agrícola; (C) tempo 2: após 2 anos do ciclo agrícola; (D) sistema x tempo. Médias seguidas de letras minúsculas nas figuras A, B e C na mesma profundidade avaliada não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ($p < 0.05$).

Após o segundo ano de manejo, não houve diferenças na densidade do solo entre as três áreas em função das camadas, indicando uma convergência dos sistemas ao longo do tempo experimental. A dinâmica entre densidade do solo e tempo (Fig. 2. D) mostrou que o manejo integrado no sistema ILP resultou em uma redução progressiva da densidade a cada ano agrícola, de modo que ao final do experimento os valores desse sistema não diferiram dos observados na vegetação nativa.

3.2 Massa de raízes

Após dois anos de integração lavoura pecuária as raízes no solo de ILP não se igualou às raízes do solo de PM, que apresentou os maiores valores e estabilidade da massa de raízes (Figura 3). Ao final das avaliações não encontramos diferença quanto a massa de raízes entre ILP e VN.

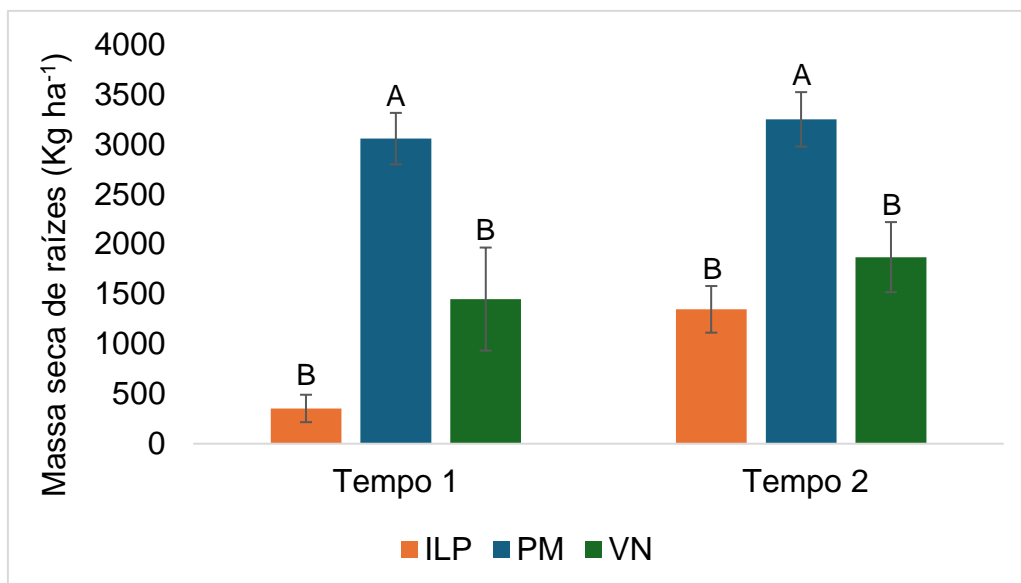


Figura 3. Massa de raízes avaliada em sistema integrado, pastagem em monocultivo e área de vegetação nativa a 0-30cm. Tempo 1: após 1 ano do ciclo agrícola; tempo 2: após 2 anos do ciclo agrícola. Médias seguidas de letras minúsculas no mesmo tempo de avaliação não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$)

3.3 Carbono orgânico total e frações de carbono

Os sistemas de produção influenciaram significativamente a concentração de carbono orgânico total e as frações de C ao longo dos anos agrícolas. Em T0, não houve diferença na concentração de COT entre ILP e PM ($p < 0,05$), enquanto VN apresentou valores superiores. Em T1 o sistema VN manteve a maior concentração de carbono orgânico total, seguido por PM e ILP, e após o segundo ano de avaliações não houve diferença estatística entre a concentração de COT dos sistemas ($p < 0,05$).

As maiores concentrações de carbono lábil foram observadas em ILP e PM durante o período T0, com VN apresentando os menores valores ($p < 0,05$). Após um

ano de manejo, PM apresentou a maior concentração de C lábil, seguido de ILP e VN, enquanto em T2 não houve diferença entre ILP e PM ($p < 0,05$), com VN apresentando a menor concentração.

A concentração de carbono solúvel foi maior em VN nas duas primeiras avaliações (T0 e T1), sem diferenças significativas entre ILP e PM nos períodos avaliados ($p < 0,05$).

Tabela 2. Concentração de carbono orgânico total e frações de carbono em sistemas de uso do solo durante diferentes períodos de avaliação.

Sistema	T0	T1	T2
	COT (g kg ⁻¹)		
ILP	21,9 ^B	14,9 ^C	33,5 ^A
PM	19,6 ^B	22,1 ^B	32,1 ^A
VN	24,9 ^A	27,6 ^A	29,8 ^A
SE	1,03	1,3	2,5
	C Lábil (g kg ⁻¹)		
ILP	1,75 ^A	1,63 ^B	3,71 ^A
PM	1,61 ^{AB}	1,95 ^A	2,88 ^{AB}
VN	1,24 ^C	1,30 ^C	1,36 ^B
SE	0,12	0,18	0,21
	C solúvel (mg kg ⁻¹)		
ILP	64,2 ^B	72,8 ^B	102,1 ^{AB}
PM	58,6 ^B	81,2 ^{AB}	129,7 ^A
VN	84,7 ^A	89,9 ^A	87,1 ^B
SE	0,33	1,11	0,93

T0: Antes da implantação dos sistemas; T1: após 1 ano do ciclo agrícola; T2: após 2 anos do ciclo agrícola. Média seguidas de letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ILP: Integração lavoura pecuária; PM: Pastagem monocultivo; VN: Vegetação nativa. COT: carbono orgânico total SE: Standard error.

3.3 Nitrogênio total e nitrogênio inorgânico

Observou-se diferença entre a concentração de NT dos sistemas apenas nas avaliações de T0 e T1 (Tabela 3). O sistema de vegetação nativa e a pastagem em monocultivo apresentaram concentração de nitrogênio total superiores aos observados no sistema integrado nos dois primeiros períodos. No entanto, no T2, não foram encontradas diferenças estatísticas entre os sistemas ($p < 0,05$).

A concentração de NT não indica a disponibilidade das formas de N assimiláveis pela planta, para tanto, observamos a dinâmica de nitrato e amônio. Para

a concentração de amônio os resultados mostraram diferenças entre os sistemas ao longo das avaliações (Tabela 3). No período T0, os sistemas ILP e PM apresentaram as maiores concentrações, sendo significativamente superior a VN ($p < 0,05$). No segundo período os três sistemas não diferiram estatisticamente quanto ao amônio ($p < 0,05$). No terceiro período, ILP e VN registraram os maiores valores de amônio, enquanto PM apresentou menor concentração ($p < 0,05$).

A concentração de nitrato apresentou variações significativas entre os sistemas ao longo dos tempos avaliados. No primeiro período, VN apresentou os maiores valores de nitrato, seguido de ILP, enquanto PM registrou a menor concentração ($p < 0,05$). No segundo período, não houve diferenças estatísticas significativas entre os sistemas. Já no terceiro período, ILP demonstrou um aumento expressivo na concentração de nitrato, superando significativamente os valores encontrados em PM e VN ($p < 0,05$), o que indica uma maior eficiência na conversão do nitrogênio orgânico em nitrato nesse sistema ao longo do tempo (Tabela 3).

Tabela 3. Concentração de nitrogênio total (NT) e frações de nitrogênio inorgânico avaliado em diferentes usos do solo.

Sistemas	NT (g kg ⁻¹)		
	T0	T1	T2
ILP	1,57 ^B	1,60 ^B	1,66 ^A
PM	1,96 ^A	2,02 ^A	1,78 ^A
VN	2,01 ^A	2,07 ^A	1,90 ^A
SE	0,08	0,08	0,08
Sistemas	Amônio (mg kg ⁻¹)		
	T0	T1	T2
ILP	26,06 ^A	25,77 ^A	16,86 ^{AB}
PM	22,53 ^{AB}	25,23 ^A	13,24 ^B
VN	17,56 ^B	26,14 ^A	20,26 ^A
SE	1,68	1,38	2,94
Sistemas	Nitrato (mg kg ⁻¹)		
	T0	T1	T2
ILP	3,25 ^B	2,50 ^A	11,8 ^A
PM	1,31 ^C	3,37 ^A	3,32 ^B
VN	6,47 ^A	4,23 ^A	5,51 ^B
SE	0,45	0,96	1,29

T0: Antes da implantação dos sistemas; T1: após o primeiro plantio de soja; T2: após o segundo plantio de soja. Média seguidas de letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ILP: Integração lavoura pecuária; PM: Pastagem monocultivo; VN: Vegetação nativa. SE: Standard error.

3.4 Atividade biológica do solo

Foi observada a emissão de $\text{CO}_2\text{-C}$ ao longo dos três tempos de avaliação T0, T1 e T2 (Figura 4). Em ILP e PM houve incremento da atividade biológica após o início dos manejos. O sistema ILP apresentou semelhança ao sistema PM nas duas primeiras avaliações, e não apresentou semelhança com VN em nenhum tempo analisado. Após os dois anos agrícolas a atividade biológica do solo de ILP foi igual a de PM. O sistema VN manteve alta atividade biológica em todos os períodos analisados, e em T1 apenas PM se igualou a VN. Não encontramos semelhança entre os sistemas manejado e o sistema de vegetação nativa após os dois anos experimentais ($p < 0,05$).

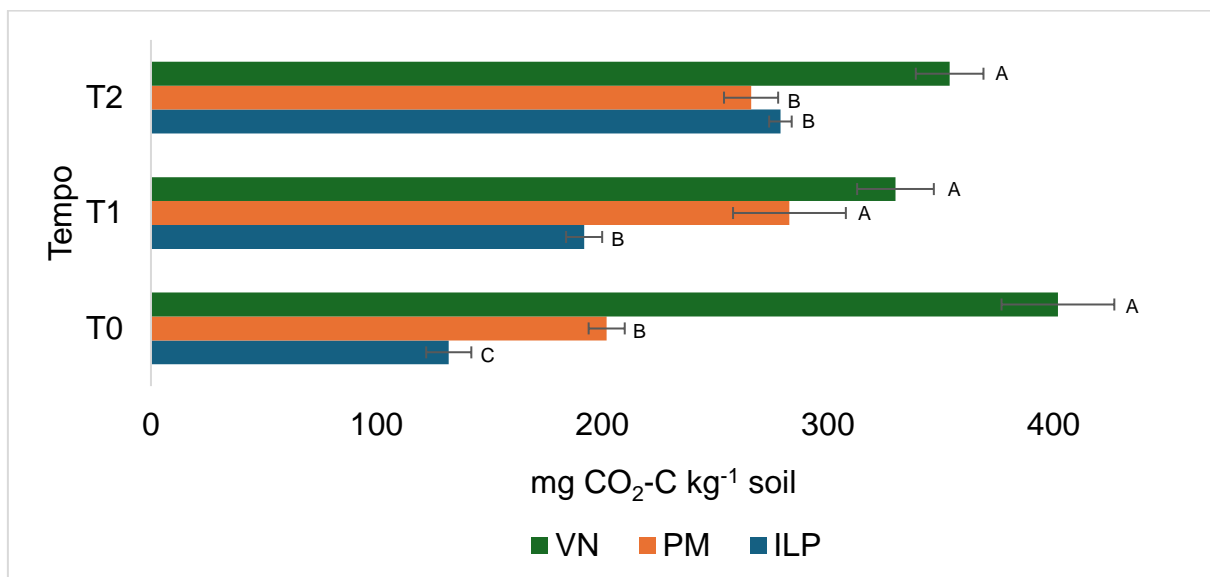


Figura 4. Atividade biológica do solo em sistemas de uso da terra avaliada em diferentes tempos. Médias seguidas de letras minúsculas iguais no mesmo tempo de avaliação não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$)

3.5 Estoque de carbono e índice de manejo do carbono.

Os estoques de carbono no solo variaram significativamente entre os sistemas (Tabela 4). Em T0 a floresta nativa apresentou os maiores estoques, enquanto ILP e pastagem não diferiram entre si ($p < 0,05$). Em T1, ILP apresentou uma redução

expressiva se diferenciando dos demais sistemas. Durante T1 os maiores estoques de C foram encontrados em VN, seguido de PM e ILP. Em T2 o sistema ILP e PM mostraram um aumento significativo comparado ao ano anterior, e não houve diferença estatística entre os três sistemas ($p < 0.05$).

Não encontramos semelhança do índice de manejo do carbono entre os sistemas manejado e a vegetação nativa em nenhum tempo de avaliação (Tabela 4). Houve redução do índice IMC no solo de ILP entre o primeiro e os seguintes anos de avaliação, enquanto em PM, apesar do aumento entre os anos experimentais, o índice não foi comparável a VN ($p < 0.05$).

Tabela 4. Estoque de carbono do solo e índice de manejo do carbono avaliado em diferentes sistemas de uso da terra.

Estoque de Carbono do solo (Mg ha^{-1}) 0-30 cm			
SISTEMA	Ano		
	1	2	3
ILP	49,1 ^B	32,2 ^C	71,7 ^A
PM	46,4 ^B	49,5 ^B	67,2 ^A
VN	61,3 ^A	66,6 ^A	67,9 ^A
Índice de manejo do carbono 0-30 cm			
SISTEMA	Ano		
	1	2	3
ILP	61 ^B	43 ^C	49 ^C
PM	77 ^B	83 ^B	87 ^B
VN	100 ^A	100 ^A	100 ^A

T0: Antes da implantação dos sistemas; T1: após 1 ano do ciclo agrícola; T2: após 2 anos do ciclo agrícola. Média seguidas de letras iguais na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0.05$). ILP: Integração lavoura pecuária; PM: Pastagem monocultivo; VN: Vegetação nativa. SE: Standard error.

4 DISCUSSÃO

4.1 Dinâmica de raízes e densidade do solo

A menor densidade do solo encontrada em VN em todas as fases de amostragem corrobora com a hipótese de que sistemas mantidos com vegetação nativa sob solos não perturbados favorecem a estruturação do solo tanto em

superfície quanto em profundidade (Polanía-Hincapié et al., 2021). Esse contraste entre sistemas não perturbados e sistemas agrícolas se torna evidente quando consideramos que a área onde ILP e PM foi manejada, era originalmente vegetação nativa, e neste estudo ILP e PM não apresentaram semelhança à VN no primeiro tempo de avaliação.

Foi observado o aumento significativo na densidade de raízes do sistema PM., que se mostrou superior a ILP e VN durante os dois anos experimentais. Apesar disso, a densidade do solo de PM não se equiparou a VN quando avaliado o sistema em função do tempo, provavelmente como consequência dos anos de ausência de manejo da pastagem, que pode levar à compactação do solo (Crush e Thom, 2011).

Mesmo com manejo de adubação e calagem, com o aumento da massa de raízes, os dois anos experimentais não foram suficientes para recuperação da estrutura do solo em PM. A velocidade de reversão da compactação do solo devido a densidade radicular pode variar conforme as mudanças nas condições ambientais e manejo, podendo variar de 10 meses (Burgess et al., 2000) a tempo superior a 2 anos (Keller et al., 2021).

Os resultados sugerem que o tipo de sistema radicular pode influenciar a reversão da compactação do solo (Jabro et al., 2021). As raízes de *Urochloa brizantha* apresentam estrutura fina e fasciculada, este tipo de sistema radicular apresenta maior densidade porém menor impacto sob os espaços porosos do solo (Maciel et al., 2022). Em contrapartida, o sistema ILP apresentou menor densidade de raízes comparado à PM, com redução da densidade do solo ao longo do tempo. Ao final das avaliações, não foi encontrada diferença significativa na densidade do solo entre o sistema ILP e o solo de VN, convergindo com os resultados de estudos que indicam que a implantação de sistema integrado é eficiente para reversão da compactação do solo a curto prazo (Nascimento et al., 2019; Ventura et al., 2023).

A menor massa de raízes e a menor densidade do solo em ILP foi associado à bioperfuração. O sistema de integração lavoura pecuária recebeu duas culturas agrícolas anuais, que promovem a bioperfuração do solo através da criação de poros decorrentes da penetração das raízes (Cresswell e Kirkegaard 1995). A soja possui sistema radicular pivotante, e o milho possui sistema radicular fasciculado, denso e fibroso, constituído de raízes primárias, laterais e adventícias de diferentes diâmetros

(Peralta et al., 2021), que podem influenciar a densidade do solo (Popova et al., 2016). Após a colheita das culturas de grão as raízes morrem e são incorporadas ao solo na forma de matéria orgânica (Mazzilli et al., 2015), contudo os poros criados pela bioperfuração não são destruídos (Cresswell e Kirkegaard 1995). No sistema ILP a forragem presente na pastagem ao final do ano agrícola foi dessecada para o início do novo ciclo agrícola completo de soja seguido de milho safrinha e capim. A dessecação favorece a ciclagem eficaz de nutrientes, liberando esses nutrientes e beneficiando a lavoura seguinte (Silva et al., 2024). Após esse processo, ocorre a morte e decomposição das raízes (Cherubim et al., 2023), que pode resultar na incorporação de matéria orgânica e no aumento da concentração de carbono no solo (Panchal et al., 2022). Dessa forma, o sistema ILP acumula raízes mortas provenientes tanto do pós-colheita quanto da dessecação do capim, fator que pode ser fundamental na recuperação da concentração de carbono neste sistema.

A contribuição de raízes vivas presentes no sistema PM pode ter contribuído para o aumento da concentração de carbono no solo através da renovação e exsudação radicular (Panchal et al., 2022). O sistema PM não passou por dessecação da forrageira, além disso, o processo de pastejo estimula a produção de raízes (Tian et al., 2024), o que justifica a alta densidade de raízes em PM quando comparado à ILP e VN. É importante considerar que o sistema PM estava plantado a tempo superior a 20 anos, já suportando raízes vivas estabelecidas, que foram estimuladas pelo manejo intensivo da pastagem.

As raízes vivas passam por renovação no solo e a matéria orgânica de raízes entra no processo de decomposição pela microbiota, enquanto os exsudatos radiculares da planta viva fornecem energia prontamente disponível para a multiplicação microbiana (Khatoon et al., 2017). Contudo, o carbono advindo de raízes vivas não é incorporado ao solo para transformação pela microbiota na mesma forma e velocidade que raízes mortas. Portanto as raízes vivas de forrageira podem liberar carbono que tem maior facilidade de se associar aos minerais, enquanto a decomposição de raízes mortas advindas da renovação radicular estimula a microbiota para formação de matéria orgânica particulada (Mueller et al., 2024). Essa dinâmica foi refletida nos resultados encontrados para carbono lábil e carbono solúvel

do sistema PM, que elevou tanto as frações lábeis quanto solúveis de carbono no solo ao decorrer dos anos agrícolas.

4.2 Dinâmica do carbono no solo

Diferentemente de sistemas agrícolas, em áreas de floresta nativa as adições e perdas de C atingem um equilíbrio dinâmico onde as variações se tornam menores com o tempo (Bayer e Mielniczuk, 2008). Durante o primeiro tempo de avaliação a maior concentração de COT na área de floresta nativa foi resultado do equilíbrio dinâmico do solo e da ausência de perturbações antrópicas, que favorecem o acúmulo de carbono. O equilíbrio em VN também pode ser observado nos dois tempos seguintes, onde o solo de vegetação nativa apresentou baixa variação na concentração de COT. Os sistemas PM e ILP não recebiam manejo de adubação ou manejo de pastejo, portanto, a igualdade da concentração de carbono desses sistemas durante a primeira avaliação é resultado da similaridade entre as áreas antes do início dos manejos, e a diferença entre o COT destes sistemas e o COT do solo de vegetação nativa reflete o impacto da ausência de manejo da pastagem sob o solo.

A implantação do sistema integrado causou redução da concentração de carbono orgânico total do solo. Apesar do cultivo nesta área ter sido realizado na forma de plantio direto, a movimentação causada no solo que estava sem perturbações por mais de 10 anos provocou mudanças na estabilidade do carbono. A matéria orgânica do solo, antes protegida nos macroagregados, passa a ser exposta à oxidação e à ação dos micro-organismos, contribuindo para a perda de carbono na forma de CO₂ (Khatoon et al., 2017). A perda de COT do solo após o primeiro ano de integração lavoura pecuária foi relatada anteriormente (Bieluczyk et al., 2020; Mattei et al., 2020; Soares et al., 2020), e os estudos demonstraram que a redução inicial de COT em sistemas recém-implantados não deve ser interpretada de forma definitiva, pois a recuperação da concentração de C pode ocorrer a partir do segundo ano ou se estender por mais de cinco anos, dependendo da intensidade de manejo, das condições climáticas e das características do solo.

Em sistemas onde há perturbação do solo, como na implantação de ILP, a quebra de macroagregados expõe frações de carbono antes protegidas, aumentando a taxa de decomposição (Six et al., 2002). Entretanto, a posterior deposição de

resíduos vegetais, principalmente quando diversificada, favorece a reconstituição dos agregados (Singh et al., 2021). Portanto, mesmo que tenha ocorrido uma perda inicial de C, a estabilidade estrutural e formação de agregados pode ser recuperada ao longo do tempo em sistemas bem manejados (Vanolli et al., 2025).

O manejo de pastagem a partir da adubação e calagem não foi suficiente para aproximar a concentração de COT no solo do sistema PM ao solo de VN após um ano experimental. A interação solo-planta é um fator chave para o aumento da concentração de C no solo, sendo a biomassa vegetal tanto acima quanto abaixo do solo o principal contribuinte para o incremento de carbono (Ostle et al., 2009). Apesar da maior densidade de raízes no sistema PM durante o primeiro ano de correção da fertilidade do solo, o carbono depositado pela biomassa da gramínea acima e abaixo do solo exerceu efeito sobre o COT apenas após o segundo ano de manejo.

O carbono orgânico total avaliado individualmente não foi considerado um indicador para determinar a dinâmica do C no solo, uma vez que diferentes frações de carbono apontam diferentes impactos do uso da terra sobre a sustentabilidade do sistema de produção (Guimarães et al., 2013). Avaliamos as frações de carbono e a redução de aproximadamente 57% na concentração de carbono lábil em ILP após a implantação do sistema sugere que mesmo práticas agrícolas conservacionistas podem ocasionar a perda de carbono do solo (Luo et al., 2017; Thomaz e Kurasz, 2023). A fração lábil do carbono é sensível à mudança de uso da terra, e a perda de C nessa fração após o cultivo mínimo do solo foi relatada por Ferreira et al., (2024); Kumar et al., (2018); Nogueirol et al., (2014). A perda de C lábil depende da intensidade de preparo do solo, das características físicas do solo e das condições de temperatura e umidade, uma vez que a intensidade de preparo pode ditar a quebra dos agregados, as características físicas moldam a força de agregação e as variáveis ambientais influenciam a atividade microbiana (Bodner et al., 2021). Nesse sentido, o monitoramento periódico das frações de carbono, especialmente as mais sensíveis, como o C lábil e o carbono orgânico solúvel em água (COSA) é essencial para ajustar as práticas de manejo.

A fração lábil do carbono, embora seja facilmente decomposta, desempenha um papel importante na formação e estabilização de agregados do solo fornecendo compostos orgânicos que atuam como “colas” entre as partículas (Bodner et al.,

2021). Enquanto o carbono solúvel em água, por apresentar maior mobilidade, pode tanto auxiliar na ligação entre partículas quanto ser transportado para camadas mais profundas, influenciando a retenção de água no solo (Cotrufo e Lavalley, 2022). A dinâmica das frações de carbono também se relaciona com atributos como pH, CTC, textura do solo e origem da matéria orgânica (Luo et al., 2017). Assim, quando há correção de acidez, fertilização equilibrada, e disponibilidade de matéria orgânica, a microbiota do solo tende a atuar de forma mais eficiente, convertendo resíduos orgânicos em frações lábeis ou recalcitrantes.

A área de integração lavoura pecuária possui maior diversidade de espécies com diferente deposição de biomassa aérea e radicular. Neste tipo de sistema os resíduos agrícolas da cultura anual são mantidos no solo, e o nitrogênio advindo da fixação biológica de nitrogênio pela leguminosa fornece energia para a microbiota decompor a matéria orgânica depositada em superfície, transformando as frações lábeis do carbono em frações mais estáveis dentro dos agregados (Kohmann et al., 2019). Apesar dessa dinâmica, as perdas de carbono total, carbono lábil e carbono orgânico solúvel em água após a perturbação inicial do solo foram maiores do que os ganhos advindos da implantação do sistema, mas o acúmulo e transformação da matéria orgânica favoreceu a recuperação de C após o segundo ciclo agrícola, onde não foram encontradas diferenças entre a concentração de carbono orgânico total e frações lábeis entre ILP e VN.

A dinâmica de carbono observada em PM foi o oposto ao observado em ILP. O aumento da concentração de carbono total, carbono lábil e do carbono orgânico solúvel em água, mostra os efeitos positivos do manejo da pastagem sobre as características químicas do solo. Ao final dos dois anos experimentais não houve diferença entre a concentração de COT e CL entre o solo de pastagem e vegetação nativa. Assim, verifica-se que o alto volume de raízes novas no solo de pastagem foi fator predominante para o maior carbono solúvel em água de PM quando comparado à VN na faixa de 0-30 cm de solo.

A transformação de carbono no solo está diretamente relacionado à atividade de fungos, bactérias e demais organismos edáficos (Six et al., 2006). O aumento do volume de raízes, COT, C lábil e COSA refletiram em maior atividade microbiana em PM, que se equiparou à atividade microbiana de solo de floresta após o primeiro ano

agrícola. Pastagens com alta concentração de carbono orgânico solúvel em água tendem a apresentar alta atividade microbiana devido as condições favoráveis para a reprodução dos micro-organismos (Khatoon et al., 2017). O conjunto de fatores relacionados à saúde do solo de PM também foi refletido sob as frações de carbono orgânico particulado e associado aos minerais. A adubação de pastagem estimulou o aumento de raízes, que disponibilizou carbono orgânico solúvel para a microbiota se reproduzir e favorecer a formação de da matéria orgânica do solo.

O incremento de 45% na atividade biológica entre T0 e T1 no sistema ILP pode ser associado à perturbação inicial do solo que causou exposição do carbono estimulando a mineralização da matéria orgânica e emissões de CO₂ equivalente. Entre T1 e T2 o aumento da atividade microbiana foi associado ao efeito do sistema, uma vez que houve aumento em todas as frações de carbono do solo. Ao final do segundo ano, os sistemas ILP e VN não apresentarem diferença quanto a concentração de carbono orgânico total enquanto o sistema ILP apresentou maior concentração de carbono lábil, porém a atividade microbiana em ILP não se equiparou à atividade microbiana da área de floresta. A menor atividade microbiana não necessariamente significa que não há ciclagem de nutrientes de forma eficiente, mas pode indicar que o carbono presente no solo está protegido dentro de diferentes tamanhos de agregados, dificultando o acesso da microbiota (Vasilchenko et al., 2023).

Diante do exposto, rejeitamos a hipótese que sistema agrícolas integrados entre culturas anuais e gramíneas promove maior atividade microbiana, mas aceitamos que esse tipo de sistema resulta em maior acúmulo de carbono no solo.

4.3 Estoque de carbono e índice de manejo do carbono.

O estoque de carbono do solo e o índice de manejo do carbono são calculados respectivamente a partir das associações entre a concentração de carbono total e a densidade do solo (Sisti et al., 2004) e entre frações de carbono e concentração de carbono total (Blair et al., 1995). Esses valores refletem a capacidade do solo em reter carbono e se aproximar à qualidade do solo de áreas de floresta. Por não termos encontrado semelhança entre os sistemas manejados e a área referência quanto ao

IMC, mas termos encontrado semelhança ente os estoques de carbono dos sistemas após os dois anos experimentais, nossos resultados sugerem que embora o carbono tenha sido acumulado durante os anos, ele se encontra em uma forma menos estabilizada e, portanto, mais suscetível à mineralização.

Não existe um valor ideal de IMC. O índice fornece uma medida sensível da taxa de mudança na dinâmica do C no solo dos sistemas em relação a um solo de referência mais estável, e indica se o sistema está em declínio ou sendo reabilitado (Blair et al., 1995). O manejo do solo de ILP e PM promoveu o aumento da fração lábil do carbono em relação ao carbono total, o que é benéfico para a manutenção da fertilidade do solo no curto e médio prazo, porém O IMC abaixo de 100 encontrado nas áreas manejadas indica que o incremento de C ainda não é suficiente para aproximar o solo desses sistemas à qualidade do solo de floresta nativa.

Os estoques de carbono foram corrigidos para equivalente massa e não houve diferença entre os sistemas e o solo de VN. Sendo assim, constatamos que, ao final de dois anos de manejo a retenção de carbono ocorreu de forma igual em todos os sistemas, sem considerar as particularidades de cada fração de C. Esse resultado mostrou que as práticas de manejo integrados ou de recuperação de pastagem podem promover a recuperação do carbono no solo, mas o estoque de C não deve ser usado como um único indicador de saúde do solo.

O solo necessita de tempo para armazenar carbono em formas recalcitrantes e estáveis, e neste estudo tanto o manejo da pastagem quanto a implantação de sistema integrado favoreceram as frações lábeis do solo, que podem ser perdidas e modificar o estoque de C. Portanto, a análise integrada dos estoques e dos índices de manejo do carbono ressalta a importância de não apenas aumentar a quantidade total de carbono armazenado no solo, mas também de promover práticas que favoreçam sua proteção e incorporação em frações estáveis.

4.4 Dinâmica do nitrogênio no solo

A ciclagem de nitrogênio no solo depende diretamente da conversão de compostos orgânicos em formas inorgânicas, como amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) (Van Groenigen et al., 2015). A igualdade entre os sistemas ILP, PM quanto a

concentração de amônio mostrou que nesses sistemas de uso da terra a transformação do nitrogênio orgânico em nitrogênio inorgânico na forma de amônio aconteceu de forma semelhante, indicando que a microbiota do solo possui substrato orgânico equiparável entre os sistemas para a primeira etapa do ciclo do nitrogênio, que é a conversão de N orgânico em NH_4^+ .

O *input* de nitrogênio associado à matéria orgânica é o principal substrato para a atividade das bactérias e fungos, que transformam o nitrogênio orgânico em amônio e posteriormente nitrato (Khan et al., 2016). Embora a concentração de amônio não tenha apresentado diferenças significativas entre os sistemas ILP, PM, o nitrato se destacou no sistema ILP ao final de dois ciclos agrícolas, sugerindo uma maior eficiência de conversão do nitrogênio orgânico em formas prontamente assimiláveis pelas plantas (Van Groenigen et al., 2015). As plantas são capazes de absorver amônio como fonte de nitrogênio, porém o NH_4 pode ser tóxico devido ao acúmulo no citoplasma das células vegetais, causando inibição do crescimento radicular e desbalanço fisiológico (Esteban et al., 2016). A assimilação de nitrogênio na forma de nitrato exige mais energia, mas a regulação é mais estável nas plantas, sendo a forma mais absorvível pelas forrageiras. A diferença encontrada para a concentração de nitrato mostra que ao final de dois ciclos agrícolas o sistema ILP apresenta maior eficiência de conversão de amônio em formas mais assimiláveis de N, favorecendo os processos de mineralização e nitrificação, garantindo um suprimento de N para as culturas subsequentes.

O sistema ILP possui diferentes fontes de adição de matéria orgânica, tendo a soja como uma leguminosa fixadora de nitrogênio, além da adubação mineral fornecida à cultura do milho, enquanto o sistema de pastagem em monocultivo tem o fertilizante mineral como principal fonte de N. Resíduos de leguminosas, como a soja, apresentam menor relação C:N e são decompostos mais rapidamente, oferecendo fontes de nitrogênio prontamente acessíveis aos microrganismos (Gezahegn et al., 2016), enquanto o fertilizante mineral aplicado no sistema PM pode sofrer rápida volatilização e consequentes perdas.

Após o manejo de adubação da área de pastagem em monocultivo observamos concentração semelhante de nitrato nesse sistema nos tempos T1 e T2. Pastagens sob monocultivo e bem manejadas tendem a apresentar equilíbrio na concentração

de nitrato no solo uma vez que a microbiota é menos diversa para a decomposição da matéria orgânica, limitando a liberação de grandes quantidades de N para o solo. Essa limitação não exerce efeitos significativos sob a ciclagem de nutriente, mas pode exercer influência sob a emissão de CO₂-C. Os resíduos de gramíneas e forrageiras podem conter frações mais recalcitrantes como lignina e compostos fenólicos, que prolongam o processo de decomposição (Dubeux et al., 2007), fazendo com que a microbiota precise decompor a M.O com mais intensidade para ter acesso ao nitrogênio, afetando a emissão de CO₂-C. O oposto pode ser observado em ILP. Como a microbiota do solo possui alta disponibilidade de nitrato no sistema integrado em decorrência dos resíduos de baixa relação C:N, o processo de decomposição da matéria orgânica pode ser inibido nesse sistema, uma vez que a biomassa microbiana não necessita acessar o nitrogênio presente em frações menos lábeis da matéria orgânica. Assim, a heterogeneidade de substratos no ILP tende a manter a microbiota ativa ao longo de todo o ciclo agrícola, beneficiando a ciclagem de N, e reduzindo a emissão de gases.

A conversão intensa de amônio em nitrato pode estar acompanhada de maiores riscos de lixiviação, sobretudo em solos com alta pluviosidade (Fan et al., 2010). O nitrato, por ser uma forma iônica solúvel, se desloca facilmente no perfil do solo, podendo resultar em perda de N para camadas mais profundas e distante do acesso radicular. Como a concentração de nitrato no solo de ILP foi crescente no decorrer do experimento, acreditamos que este sistema foi mais eficiente em evitar as perdas por lixiviação. O segundo ano agrícola foi marcado por maior volume de chuvas e maiores temperaturas, e mesmo sob essas condições a concentração de nitrato aumentou significativamente, não havendo indícios de perdas.

Embora os resultados ao final de dois ciclos agrícolas já indiquem tendências claras de maior mineralização e nitrificação no ILP, avaliações de longo prazo são essenciais para confirmar a estabilidade desses processos. Sistemas integrados, como o ILP, apresentam a vantagem de uma ciclagem mais eficiente de nutrientes, mas também demandam maior planejamento. O balanceamento entre entradas de matéria orgânica, fixação biológica de N e períodos de pousio ou pastejo precisa ser ajustado para que o potencial de ciclagem se mantenha elevado. Assim, pesquisas de maior duração podem esclarecer se a conversão intensa de N em nitrato persiste ou

se ocorre um processo de saturação, em que a disponibilidade de N se estabiliza em níveis distintos dos observados inicialmente.

Estudos prévios em sistemas de integração lavoura-pecuária têm reportado resultados semelhantes, com aumento na disponibilidade de N inorgânico e melhora na fertilidade do solo em comparação a sistemas convencionais de monocultivo (Du et al., 2020; Otieno et al., 2024). A adoção de leguminosas na rotação e a presença de forrageiras perenes são citadas como fatores-chave para estimular a microbiota e promover a ciclagem eficiente de nutrientes, corroborando os dados encontrados neste estudo. Embora os resultados obtidos reforcem o potencial do ILP em dinamizar o ciclo de nitrogênio, a extrapolação para outras realidades produtivas deve ser feita com cautela, levando em conta as especificidades de cada sistema agrícola.

5 CONCLUSÃO

A adoção do sistema integrado e o uso de uma estratégia de manejo da pastagem elevam o potencial de restauração dos atributos físicos e químicos do solo, promovendo o acúmulo de carbono e a ciclagem de nutrientes. O sistema ILP, por receber diversidade de culturas, é mais eficiente na ciclagem de nitrogênio e pode ser utilizado para reduzir a densidade aparente e influenciar a massa de raízes presente no solo. Após dois anos experimentais, ILP e PM apresentaram estoques de carbono equivalentes ao solo de vegetação nativa, porém com frações mais lábeis e, portanto, menos estáveis. O aumento da ciclagem de nutrientes e saúde do solo em sistemas integrados pode acontecer após dois anos de manejo, mas requer continuidade para que o carbono seja estabilizado em formas recalcitrantes. Tanto sistema integrado quanto intensificação do uso de pastagem em monocultivo são estratégias eficientes para aumentar a saúde do solo, mas é necessário considerar a influência da saúde do solo nos fatores produtivos do sistema.

6 REFERÊNCIAS

Bartlett, R. J.; Ross, D. S. (1988). Colorimetric determination of oxidizable carbon in acid soil solutions. **Soil Science Society of America Journal**, 52, 1191-1192.

Bayer, C., Mielniczuk, J. (2008). Dinâmica E Função Da Matéria Orgânica. *In*: Santos, G. A., Silva, L. S., Canellas, L. P., Camargo, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2ªed. Porto Alegre: Metrópole, p. 9-26.

Bieluczyk, W., Piccolo, M. de C., Pereira, M. G., Moraes, M. T. de, Soltangheisi, A., Bernardi, A. C. de C., Pezzopane, J. R. M., Oliveira, P. P. A., Moreira, M. Z., Camargo, P. B. de, Dias, C. T. dos S., Batista, I., Cherubin, M. R. (2020). Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. **Geoderma**, 371. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114368>

Bisutti, I.; Hilke, I.; Raessler, M. (2004). Determination of total organic carbon – an overview of current methods. **Trends in Analytical Chemistry**, 23(10-11), 716-726.

Blair, G.J., Lefroy, R. D.B., Lisle, L., (1995). Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, 46, 1459-1466. <https://doi.org/10.1071/AR9951459>.

Bodner, G., Mentler, A., Keiblinger, K. (2021). Plant roots for sustainable soil structure management in cropping systems. *In*: Rengel, Z., Djalovick, I. **The root systems in sustainable agricultural intensification**, 45, 90-98. <https://doi.org/10.1002/9781119525417.ch3>.

Burgess, C. P., Chapman, R., Singleton, P. L., Thom, E. R. (2000). Shallow mechanical loosening of soil under dairy cattle grazing: Effects on soil and pasture. New Zealand. **Journal of Agricultural Research**, 43(2), 279–290. <https://doi.org/10.1080/00288233.2000.9513428>

Carvalho, P. C. de F., Anghinoni, I., de Moraes, A., de Souza, E. D., Sulc, R. M., Lang, C. R., Flores, J. P. C., Terra Lopes, M. L., da Silva, J. L. S., Conte, O., de Lima W. C., Levien, R., Fontaneli, R. S., Bayer, C. (2010). Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in agroecosystems**, 88(2), 259–273. <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9360-x>

Cherubim, M. R., Maia, S. M. F., Damião, J. M., Cerri, C.E.P. Matéria orgânica do solo em áreas de pastagens no Brasil. *In*: **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropicais e subtropicais**. Bettiol, W., Silva, C. A, Cerri, C. E. P., Martin-Neto, L., Andrade, C. A, Eds.; Embrapa: Brasília; p 601–625.

Conant, R. T., Cerri, C. E. P., Osborne, B. B., Paustian, K. (2017). Grassland management impacts on soil carbon stocks: A new synthesis. **Ecological Applications**, 27(2), 662–668. <https://doi.org/10.1002/eap.1473>

Cotrufo, M. F., Lavalley, J. M. (2022). Soil organic matter formation, persistence, and functioning: a synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. **Advances in Agronomy**, 172, 1-66. <http://dx.doi.org/10.1016/bs.agron.2021.11.002>.

Cresswell, H. P., Kirkegaard, J. A. (1995). Subsoil amelioration by plant-roots - the process and the evidence. **Soil Research**, 33(2), 221, 1995. <http://dx.doi.org/10.1071/sr9950221>.

- Crush, J. R., Thom, E. R. (2011). Review: The effects of soil compaction on root penetration, pasture growth and persistence. **Pasture Persistence – Grassland Research and Practice Series**, 15, 73-78.
- Doane, T.A., Horwath, W.R., (2003). Spectrophotometric determination of nitrate with a single reagent. **Anal. Lett.** 36, 2713–2722. <https://doi.org/10.1081/AL-120024647>.
- Du, Q., Zhou, L., Chen, P., Liu, X., Song, C., Yang, F., Wang, X., Liu, W., Sun, X., Du, J. (2020). Relay-intercropping soybean with maize maintains soil fertility and increases nitrogen recovery efficiency by reducing nitrogen input. **The Crop Journal**, 8(1), 140-152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cj.2019.06.010>.
- Dubeux, J. C. B., Sollenberger, L. E., Mathews, B. W., Scholberg, J. M., Santos, H. Q. (2007). Nutrient cycling in warm-climate grasslands. **Crop Science**, 47(3), 915–928. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.09.0581>
- Esteban, R., Ariz, I., Cruz, C., Moran, J. F. (2016). Review: Mechanisms of ammonium toxicity and the quest for tolerance. **Plant Science**, 248, 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.04.008>
- Fan, J., Hao, M., Malhi, S., (2010). Accumulation of nitrate N in the soil profile and its implications for the environment under dryland agriculture in northern China: a review. **Canadian Journal of Soil Science**, 90(3), 429-440. <http://dx.doi.org/10.4141/cjss09105>.
- FAO. (2021). Land cover statistics. Global, regional and country trends, 2000–2019. **FAOSTAT Analytical Brief Series No. 37**. Rome.
- Ferreira, C. dos S., Tavares, R. L. M., Paiva Filho, S. V. de, Cantão, V. C. G., Simon, G. A., Alves, J. M., Nascimento, H. L. B. do, Bilego, U. O. (2024). Stock of carbon and soil organic fractions in no-tillage and crop–livestock integration systems. **Sustainability**, 16(7). <https://doi.org/10.3390/su16073025>
- Foster, J. C. (1995). Soil nitrogen. *In*: Alef, K., Nannipieri, P. (Eds.), **Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry**. Academic, San Diego.
- Franzluebbers, A. J., Sawchik, J., Taboada, M. A. (2014). Agronomic and environmental impacts of pasture-crop rotations in temperate North and South America. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 190, 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.017>
- Franzluebbers, A.J., (2018). Assessment and interpretation of soil-test biological activity. *In*: Karlen, D.L., Stott, D.E., Mikha, M.M. Laboratory methods for soil health analysis. **Asa, Cssa, And Sssa Books**, chap. 8, 126-151.
- Frasier, I., Quiroga, A., Fernández, R., Álvarez, C., Gómez, F., Scherger, E., Gili, A., Noellemeyer, E. (2019). Soil type, land-use and -management as drivers of root-C inputs and soil C storage in the semiarid pampa region, Argentina. **Soil and Tillage Research**, 192, 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.010>
- Gezahegn A, M, Halim, R. A., Yusoff, M., Wahid, S, A. (2016). Decomposition and Nitrogen mineralization of Individual and Mixed Maize and Soybean Residue. **Journal of Agricultural Science**, 2, 28-45.

- Guimarães, D. V., Gonzaga, M. I. S., da Silva, T. O., da Silva, T. L., da Silva Dias, N., Matias, M. I. S. (2013). Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land uses. **Soil and Tillage Research**, 126, 177–182. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.010>
- Jabro, J. D., Allen, B. L., Rand, T., Dangi, S. R., Campbell, J. W. (2021). Effect of previous crop roots on soil compaction in 2 yr rotations under a no-tillage system. **Land**, 10(2), 1–10. <https://doi.org/10.3390/land10020202>
- Keller, T., Colombi, T., Ruiz, S., Schymanski, S. J., Weisskopf, P., Koestel, J., Sommer, M., Stadelmann, V., Breitenstein, D., Kirchgessner, N., Walter, A., Or, D. (2021). Soil structure recovery following compaction: Short-term evolution of soil physical properties in a loamy soil. **Soil Science Society of America Journal**, 85(4), 1002–1020. <https://doi.org/10.1002/saj2.20240>
- Khan, K. S., Mack, R., Castillo, X., Kaiser, M., Joergensen, R. G. (2016). Microbial biomass, fungal and bacterial residues, and their relationships to the soil organic matter C/N/P/S ratios. **Geoderma**, 271, 115 - 123. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.019>
- Khatoon, H., Solanki, P., Narayan, M., Tewari, L., Rai, J., Hina Khatoon, C. (2017). Role of microbes in organic carbon decomposition and maintenance of soil ecosystem. International. **Journal of Chemical Studies**, 5(6), 1648–1656.
- Kohmann, M. M., Sollenberger, L. E., Dubeux, J. C. B., Silveira, M. L., Moreno, L. S. B. (2019). Legume proportion in grassland litter affects decomposition dynamics and nutrient mineralization. **Agronomy Journal**, 111(3), 1079–1089. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.09.0603>
- Kumar, V., Kumar, S., Patel, S. V., Kumar, S., Kumar, S. (2018). Tillage, crop residue, and nitrogen levels on dynamics of soil labile organic carbon fractions, productivity and grain quality of wheat crop in Typic Ustochrept soil. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, 7(1): 598-609.
- Lal, R. (2018). Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. **Global Change Biology**, 24(8), 3285–3301. <https://doi.org/10.1111/gcb.14054>.
- Lehmann, J., Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, 528(7580), 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Lemaire, G., Franzluebbers, A., Carvalho, P. C. de F., Dedieu, B. (2014). Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 190, 4–8. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.08.009>
- Luo, Z., Feng, W., Luo, Y., Baldock, J., Wang, E. (2017). Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions. **Global Change Biology**, 23(10), 4430–4439. <https://doi.org/10.1111/gcb.13767>
- Maciel, J. C., Duque, T. S., Ferreira, E. A., Zanuncio, J. C., Plata-Rueda, A., Silva, V. P., Silva, D. V., Fernandes, B. C. C., Barros Júnior, A. P., dos Santos, J. B. (2022).

Growth, Nutrient Accumulation, and Nutritional Efficiency of a Clonal Eucalyptus Hybrid in Competition with Grasses. **Forests**, 13(8), 1157. <https://doi.org/10.3390/f13081157>

MapBiomass - Mapeamento Anual de Cobertura e Uso da Terra no Brasil - **Coleção 9**, acessado em 03 de março de 2025 através do link: https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2024/12/Factsheet-Pastagem_C9_05.12_v3.pdf

Mattei, E., Oliveira, P. S. R., Rampim, L., Rego, C. A. R. de M., Piano, J. T. P., Sampaio, M. C. (2020). Carbon, nitrogen, and organic matter of soil in an integrated crop-livestock system. **Journal of Neotropical Agriculture**, 7(4), 7–14. <https://doi.org/10.32404/rean.v7i2.4526>

Mazzilli, S. R., Kemanian, A. R., Ernst, O. R., Jackson, R. B., Piñeiro, G. (2015). Greater humification of belowground than aboveground biomass carbon into particulate soil organic matter in no-till corn and soybean crops. **Soil Biology and Biochemistry**, 85, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.02.014>

Mueller, C. W., Baumert, V., Carminati, A., Germon, A., Holz, M., Kögel-Knabner, I., Peth, S., Schlüter, S., Uteau, D., Vetterlein, D., Teixeira, P., Vidal, A. (2024). From rhizosphere to detritosphere – Soil structure formation driven by plant roots and the interactions with soil biota. **Soil Biology and Biochemistry**, 193, 109396. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109396>

Nascimento, D. M. do, Cavalieri-Polizeli, K. M. V., Silva, A. H. da, Favaretto, N., Parron, L. M. (2019). Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. **Soil and Tillage Research**, 186, 292–299. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.016>

Nizamani, M. M., Hughes, A. C., Qureshi, S., Zhang, Q., Tarafder, E., Das, D., Acharya, K., Wang, Y., Zhang, Z. G. (2024). Microbial biodiversity and plant functional trait interactions in multifunctional ecosystems. **Applied Soil Ecology**, 201, 105515. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105515>

Nogueirol, R. C., Cerri, C. E. P., Silva, W. T. L. da, Alleoni, L. R. F. (2014). Effect of no-tillage and amendments on carbon lability in tropical soils. **Soil and Tillage Research**, 143, 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.05.014>

Ostle, N. J., Smith, P., Fisher, R., Ian Woodward, F., Fisher, J. B., Smith, J. U., Galbraith, D., Levy, P., Meir, P., McNamara, N. P., Bardgett, R. D. (2009). Integrating plant-soil interactions into global carbon cycle models. **Journal of Ecology**, 97(5), 851–863. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01547.x>

Otieno, E. O., Lenga, F. K., Mburu, D. M.; Kiboi, M. N., Fliessbach, A., Ngetich, F. K. (2024). Combined inorganic and organic fertilizers improved soil microbial biomass and nitrogen dynamics in Upper Eastern region of Kenya. **Geoderma**, 39, e00869. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00869>.

Panchal, P., Preece, C., Peñuelas, J., Giri, J. (2022). Soil carbon sequestration by root exudates. **Trends in Plant Science**, 27(8), 749–757. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.04.009>

Peralta, G., Alvarez, C. R., Taboada, M. A. (2021). Soil compaction alleviation by deep non-inversion tillage and crop yield responses in no tilled soils of the Pampas region

of Argentina. A meta-analysis. **Soil and Tillage Research**, 211, 105022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105022>

Pilbeam, D. J. (2015). Nitrogen. *In*: Pilbeam D. J., Barker, A. V., **Handbook of plant nutrition**, p. 764. CRC Press.

Polanía-Hincapié, K. L., Olaya-Montes, A., Cherubin, M. R., Herrera-Valencia, W., Ortiz-Morea, F. A., Silva-Olaya, A. M. (2021). Soil physical quality responses to silvopastoral implementation in Colombian Amazon. **Geoderma**, 386, 114900. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114900>

Popova, L., Van Dusschoten, D., Nagel, K. A., Fiorani, F., Mazzolai, B. (2016). Plant root tortuosity: An indicator of root path formation in soil with different composition and density. **Annals of Botany**, 118(4), 685–698. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw057>

Shang, C., Tiessen, H. (1997). Organic matter lability in a tropical oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density and magnetic fractionations. **Soil Science**, 162(11), 795-807.

Silva, J. A. G., Costa, K. A. P., Severiano, E. C., Silva, A. G., Vilela, L., Leandro, W. M., Muniz, M. P., Silva, L. M., Mendonça, K. T. M., Barros, V. M. (2024). Efficiency of desiccation, decomposition and nutrient release in the biomass of forage plants of the genus *Brachiaria* after intercropping with sorghum in integrated systems for soybean productivity. **Communications In Soil Science and Plant Analysis**, 55 , 1644–1662.

Singh, P., Mukherjee, S., Saha, N., Biswas, S., Mandal, B. (2021). Conservation Agriculture in Reshaping Belowground Microbial Diversity. *In*: Rakshit, A., Singh, S., Abhilash, P., Biswas, A. **Soil Science: Fundamentals to Recent Advances**. 141-173. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0917-6_8

Sisti, C. P. J., Dos Santos, H. P., Kochhann, R. A., Alves, B. J. R., Urquiaga, S., Boddey, R. M. (2004) Change In Carbon And Nitrogen Stocks In Soil Under 13 Years Of Conventional Or Zero Tillage In Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, 76, 39–58. <https://doi.org/10.1016/J.Still.2003.08.007>.

Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, 241, 155-176 <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>.

Six, J., Frey, S. D., Thiet, R. K., Batten, K. M. (2006). Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems. **Soil Science Society of America Journal**, 70(2), 555–569. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0347>

Smith, P., Soussana, J. F., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D. P., Batjes, N. H., van Egmond, F., McNeill, S., Kuhnert, M., Arias-Navarro, C., Olesen, J. E., Chirinda, N., Fornara, D., Wollenberg, E., Álvaro-Fuentes, J., Sanz-Cobena, A., Klumpp, K. (2020). How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. **Global Change Biology**, 26, (1), 219–241) <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>.

Soares, M. B., Freddi, O. da S., Matos, E. da S., Tavanti, R. F. R., Wruck, F. J., de Lima, J. P., Marchioro, V., Franchini, J. C. (2020). Integrated production systems: An

alternative to soil chemical quality restoration in the Cerrado-Amazon ecotone. **Catena**, 185, 104279. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104279>

Thomaz, E. L., Kurasz, J. P. (2023). Long Term of Soil Carbon Stock in No-Till System Affected by a Rolling Landscape in Southern Brazil. **Soil Systems**, 72(6), 60. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7020060>

Tian, T., Guo, J., Yang, Z., Yao, Z., Liu, X., Wang, Z. (2024). Effects of Different Grazing Treatments on the Root System of *Stipa krylovii* Steppe. **Sustainability**, 16(10), 3975. <https://doi.org/10.3390/su16103975>

Van Groenigen, J. W., Huygens, D., Boeckx, P., Kuyper, T. W., Lubbers, I. M., Rütting, T., Groffman, P. M. (2015). The soil n cycle: New insights and key challenges. **Soil**, 1(1), 235–256. <https://doi.org/10.5194/soil-1-235-2015>

Vanolli, B. da S., Dias, H. B., da Luz, F. B., Lamparelli, R. A. C., Magalhães, P. S. G., Cherubin, M. R. (2025). Crop–Livestock Integrated Systems Improve Soil Health in Tropical Sandy Soils. **Agronomy**, 15(2), 378. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020378>

Vasilchenko, A. V., Galaktionova, L. V., Tretyakov, N. Y., Dyachkov, S. M., & Vasilchenko, A. S. (2023). Impact of agricultural land use on distribution of microbial biomass and activity within soil aggregates. **Soil Use and Management**, 39(1), 618–633. <https://doi.org/10.1111/sum.12844>

Ventura, M. V. A., Menezes Filho, A. C. P. de, Batista-Ventura, H. R. F. (2023). Chemical, physical, and biological attributes of the soil in integrated systems. **Brazilian Journal of Science**, 2(4), 90–98. <https://doi.org/10.14295/bjs.v2i4.300>

Wander, M. (2004). Soil Organic Matter Fractions and Their Relevance to Soil Function. *In*: Magdoff, F. Weil, R. (Eds.), **Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture**, 1, 67-102. <https://doi.org/10.1201/9780203496374.ch3>

Wang, X., Yin, L., Dijkstra, F. A., Lu, J., Wang, P., Cheng, W. (2020). Rhizosphere priming is tightly associated with root-driven aggregate turnover. **Soil Biology and Biochemistry**, 149. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107964>

Whalen, J. K., Gul, S., Poirier, V., Yanni, S. F., Simpson, M. J., Clemente, J. S., Feng, X., Grayston, S. J., Barker, J., Gregorich, E. G., Angers, D. A., Rochette, P., Janzen, H. H. (2014). Transforming plant carbon into soil carbon: Process-level controls on carbon sequestration. **Canadian Journal of Plant Science**, 94(6), 1065–1073. <https://doi.org/10.4141/CJPS2013-145>.

Yeomans, J. C., Bremner, J. M. (1988). A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 19, 1467-1476.

CAPÍTULO 3 – Produtividade e valor nutritivo de *Urochloa brizantha* cv. Marandu cultivado sob monocultivo e sistema integrado

Resumo - As pastagens são muito importantes para a pecuária brasileira, sendo os sistemas em monocultivo a forma predominante de produção. Novos sistemas têm sido estudados como alternativas ao monocultivo para reduzir os efeitos da sazonalidade da produção forrageira sem prejudicar o valor nutritivo da gramínea. Este estudo avaliou a produção de massa de forragem, valor nutritivo e as emissões de metano de *Urochloa Brizantha* cv. Marandu sob dois sistemas de produção: Integração lavoura pecuária (ILP), e pastagem perene sob monocultivo (PM), com a hipótese de que a integração lavoura pecuária influencia positivamente a produtividade e qualidade da forragem enquanto reduz os impactos ambientais. O experimento foi realizado ao longo de dois anos e as variáveis analisadas incluíram biomassa forrageira, composição morfológica, proteína bruta, fibra em detergente neutro, fibra em detergente ácido, digestibilidade da matéria seca *in vitro*, e emissões de CH₄ *in vitro*. A análise estatística empregou o teste t de Student ($p < 0.05$), D de Cohen (tamanho de efeito), e análise de componentes principais (PCA). O sistema ILP produziu forragem com maior porcentagem de folhas e maior concentração de proteína bruta e fibras, além de maior digestibilidade ($p < 0,001$; D Cohen $> 6,0$). Não encontramos diferença quanto a produção de massa de forragem a cada ciclo de pastejo dos sistemas. O PCA revelou uma clara separação entre os sistemas de produção, onde ILP se correlacionou com variáveis nutricionais e proporção foliar, enquanto o PM esteve ligado à biomassa senescente, fibras e emissões de CH₄. O sistema integrado ofereceu um modelo de intensificação sustentável, onde houve maior ganho produtivo, que não foi acompanhado por aumento de fatores desfavoráveis típicos de sistemas convencionais.

Palavras-chave: pastagens tropicais, qualidade da forragem, sistemas integrados, ,.

CHAPTER 3 - Nutritive value of *Urochloa brizantha* cv. marandu cultivated under monoculture and integrated system.

Abstract - Pasture systems are of great importance to Brazilian livestock production, with monoculture systems being the predominant form of production. New systems have been studied as alternatives to monoculture to mitigate the seasonality of forage production without compromising the nutritional value of grasses. This study evaluated forage mass production, nutritional value, and methane emissions of *Urochloa brizantha* cv. Marandu under two production systems: Crop-Livestock Integration (ILP) and perennial monoculture pasture (PM), with the hypothesis that ILP positively influences forage productivity and quality while reducing environmental impacts. The experiment was conducted over two years, and the analyzed variables included forage biomass, morphological composition, crude protein, neutral detergent fiber, acid detergent fiber, in vitro dry matter digestibility, and in vitro CH₄ emissions. Statistical analysis employed Student's t-test ($p < 0.05$), Cohen's d (effect size), and Principal Component Analysis (PCA). The ILP system produced forage with a higher percentage of leaves, higher crude protein and fiber concentrations, and greater digestibility ($p < 0.001$; Cohen's $d > 6.0$). No differences were found in forage mass production per grazing cycle between systems. PCA revealed a clear separation between production systems, where ILP correlated with nutritional variables and leaf proportion, while PM was linked to senescent biomass, fibers, and CH₄ emissions. The integrated system offered a sustainable intensification model, delivering greater productive gains without increasing unfavorable factors typical of conventional systems.

Keywords: forage quality, integrated systems, tropical pastures.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma das maiores áreas de pastagem do mundo, abrangendo cerca de 170 milhões de hectares, que desempenham um papel fundamental na produção animal, principalmente na pecuária bovina (Mapbiomas, 2024). O valor nutritivo das forragens utilizadas na alimentação animal é um dos fatores determinantes do desempenho produtivo dos sistemas pecuários, e as gramíneas tropicais se destacam devido a adaptabilidade climática, capacidade produtiva e potencial nutritivo mesmo em condições desfavoráveis (Jayasinghe et al., 2022). Apesar disso, se mal manejadas, as gramíneas podem enfrentar desafios quanto ao valor nutritivo, que é influenciado por fatores relacionados ao manejo, afetando os processos fisiológicos e bioquímicos da planta (Moore et al., 2020).

O valor nutritivo das forrageiras está diretamente relacionado a parâmetros como concentração de proteína bruta, de fibras e digestibilidade. A proteína bruta é determinada principalmente pela assimilação de nitrogênio pelas raízes que é convertido em aminoácidos e proteínas (Mokhele et al., 2012). Esse processo depende da disponibilidade de nitrogênio no solo, que pode ser influenciada pela mineralização da matéria orgânica e pela atividade microbiana na rizosfera. Solos com disponibilidade de nutrientes e elevada atividade biológica favorecem maior absorção de nitrogênio e síntese de proteínas pelas plantas (Geisseler et al., 2010) podendo resultar em maior valor nutritivo das gramíneas.

A fração fibrosa das gramíneas é constituída principalmente por celulose, hemicelulose e lignina, e exerce papel estrutural nas plantas. A concentração de fibras é regulada por fatores relacionados ao crescimento e maturidade das plantas, que são influenciados por condições ambientais, manejo da pastagem e fertilidade do solo (Abdul Khalil et al., 2016). As gramíneas em estágios avançados de maturidade apresentam maior concentração de frações fibrosas, que são resistentes à digestão ruminal, reduzem a digestibilidade da forragem e aumentam a produção de metano por unidade de produto animal (Eugène et al., 2021).

A digestibilidade é um fator-chave na eficiência alimentar e está diretamente relacionada tanto à composição química quanto estrutural das plantas (Barrière et al., 2003). Processos bioquímicos, como a biossíntese e deposição de carboidratos estruturais e não estruturais determinam o potencial energético disponível para os

animais (Tedeschi et al., 2023). O metano (CH_4) é um subproduto resultante da fermentação anaeróbica de carboidratos realizada por microrganismos metanogênicos presentes no rúmen. Esse processo ocorre principalmente pela redução de dióxido de carbono (CO_2) com hidrogênio (H_2) como substrato, derivado da fermentação microbiana dos carboidratos (Janssen, 2010). A eficiência da digestão ruminal está diretamente relacionada à composição química da dieta, onde dietas com alto teor de fibras de baixa digestibilidade aumentam a produção de hidrogênio disponível para metanogênese, resultando em maiores emissões de metano (Eugène et al., 2021). Dessa forma, o manejo das pastagens visando melhorar a digestibilidade das forragens se torna um ponto crucial na redução das emissões de CH_4 .

No contexto de pastagens do Brasil, dois modelos de produção pecuária se destacam: o monocultivo de forrageiras e os sistemas integrados, como o sistema de integração lavoura-pecuária (ILP). Os sistemas de pastagem em monocultivo ou integrado possuem diferenças quanto a resposta da gramínea ao manejo, que consequentemente influenciam processos relacionados tanto à produtividade animal quanto à sustentabilidade ambiental. Pastagens em monocultivo quando mal manejadas podem levar à redução gradativa da qualidade das forragens devido à menor reposição de nutrientes e degradação progressiva do solo, afetando negativamente os processos fisiológicos e bioquímicos das plantas (Machebe et al., 2023). Por outro lado, sistemas integrados tendem a melhorar a qualidade física, química e biológica do solo (Moraes et al., 2014), estimulando processos fisiológicos da planta que aumentam a síntese de proteínas e carboidratos altamente digestíveis, resultando em maior desempenho animal (Abdul Khalil et al., 2015)

A dinâmica de nutrientes influencia o valor nutritivo das gramíneas e as emissões de CH_4 , fatores fundamentais para a sustentabilidade e produtividade da produção animal. Para avaliar a hipótese que a adoção do sistema de integração lavoura-pecuária aumenta a qualidade nutricional da forragem e a eficiência produtiva da pastagem, sem comprometer a emissão de gases de efeito estufa, este estudo comparou os parâmetros produtivos e qualitativos de *Urochloa brizantha* cv. Marandu quando em sistema de pastagem sob monocultivo ou integração lavoura pecuária.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O experimento foi conduzido durante dois anos experimentais (2021 a 2023) no setor de forragicultura e pastagem da Universidade Estadual Paulista Júlio De Mesquita Filho, Jaboticabal, Brasil (21°14'05"S, 48°17'09"W). O clima da área experimental é classificado como úmido subtropical, com verões úmidos e invernos secos. A precipitação média anual é de 1424 mm, a temperatura média do ar é de 22,3 °C, e o solo é classificado como Oxisol. A área experimental foi implantada em uma pastagem plantada a 10 anos não manejada. Parte da pastagem foi convertida em sistema de integração lavoura pecuária (ILP), e outra parte foi mantida com pastagem em monocultivo (PM). O solo da área foi analisado ao início de cada ano agrícola para dar suporte à adubação e calagem das áreas (Tabela 1).

Tabela 1. Análise química do solo, na profundidade de 0 a 20 cm, nos dois anos de avaliação.

Variáveis	Unidade	Sistema de uso da terra			
		ILP		PM	
		1° Ano		2° Ano	
pH (CaCl ₂)		4,9	5,1	5,2	5,1
M.O.	g dm ⁻³	35	32	34	39
P	mg dm ⁻³	13	11	10	11
S	mg dm ⁻³	12	10	9	9
Ca	mmolc dm ⁻³	23	26	29	29
Mg	mmolc dm ⁻³	10	14	11	14
Na	mmolc dm ⁻³	ns	ns	ns	ns
K	mmolc dm ⁻³	4,4	3,7	6	4,6
Al	mmolc dm ⁻³	0	0	0	0
H+Al	mmolc dm ⁻³	41	42	27	25
SB	mmolc dm ⁻³	37,4	43,8	45,7	47,0
CTC	mmolc dm ⁻³	78,0	86,1	72,6	71,8
Sat. Base	V%	48	51	63	66
Sat. Al	m%	0	0	0	0

M.O: Matéria orgânica, P: fósforo, S: enxofre, Ca: Cálcio, Mg: Magnésio, Na: Sódio, K: potássio, Al: Alumínio. ILP: integração lavoura pecuária, PM: pastagem em monocultivo.

2.2 Manejo dos sistemas

A área mantida com pastagem perene em monocultivo foi implantada em 2001, era considerada uma pastagem nominal recebendo manejo mínimo de adubação, e

constituída de *Urochloa brizantha* cv. Marandu. Nesta área foi realizada calagem para correção do pH do solo seguindo as recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo, e aplicação de nitrogênio utilizando 150 Kg N ha/ano parcelada em três aplicações durante o período das águas. A gramínea foi pastejada através de manejo por altura, onde os animais pastejavam quando a gramínea atingia 30cm, e eram retirados da área quando o resíduo de pastejo atingia 15cm. A área destinada para integração lavoura pecuária também era mantida anteriormente com *Urochloa brizantha*. Para implantação do sistema a gramínea foi dessecada quimicamente, e a palhada mantida como cobertura do solo. Foi realizada semeadura de soja variedade precoce através de plantio direto, e após a colheita da soja foi plantado milho safrinha consorciado com capim-marandu, restando apenas o capim após a colheita do milho (Figura 1). O manejo de adubação tanto do plantio da soja quanto milho safrinha foi realizado seguindo as recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. A gramínea não recebeu adubação específica durante todo o ciclo agrícola.

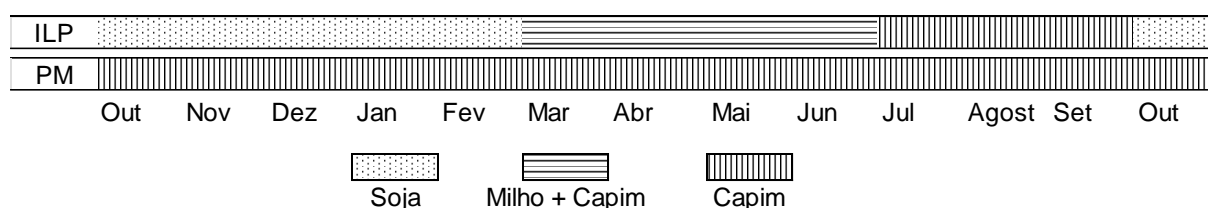


Figura 1. Condução das áreas experimentais a cada ano agrícola.

2.3 Massa de Forragem e componentes morfológicos

A massa de forragem foi estimada nos tratamentos PM e ILP com base em cortes realizados em cada pré-pastejo. As áreas experimentais foram subdivididas em cinco parcelas, e duas amostras de forragem foram coletadas em cada parcela com auxílio de moldura metálica de 0,5 x 0,5 m. As plantas foram cortadas rente ao solo e as amostras foram divididas em duas subamostras de aproximadamente 200g. Uma subamostra foi destinada para determinação do teor de matéria seca total, e a outra subamostra foi separada nos componentes folha, colmo + bainha, e material morto. As amostras foram secas em estufa de ventilação forçada a 55°C, por 72 horas para determinação de matéria seca total e matéria seca dos componentes morfológicos.

2.4 Valor nutritivo

Para avaliação da composição química bromatológica e da digestibilidade in vitro da forragem foram coletadas amostras correspondentes à fração do estrato pastejável de cada sistema. O estrato pastejável foi determinado pela diferença entre a altura do dossel no pré-pastejo e a altura no pós-pastejo anterior. As amostras foram coletadas dentro de cada parcela com o auxílio uma tesoura de poda, levadas ao laboratório, pesadas, secas em estufa com circulação forçada de ar a 55°C por 72 horas, e pesadas novamente para determinação da matéria seca da amostra. Em seguida, foram processadas em moinho do tipo Willey, com peneira de malha de 2mm e 1 mm. Após moídas as amostras foram submetidas às análises bromatológicas, seguindo as metodologias empregadas pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Ciência Animal (INCT) (Detmann et al., 2012). Os componentes químicos analisados foram N total corrigido proteína bruta pelo método de Kjeldahl (método INCT-CA N-001/1); constituintes da fração fibrosa, como fibra insolúvel em detergente neutro (FDN; método INCT-CA F-001/1), fibra em detergente ácido (FDA; método INCT-CA F-003/1), ambos pelo método de analisador de fibras ANKOM (ANKOM Technology, EUA) e por fim foi determinada a digestibilidade da MS e produção de metano in vitro no laboratório Lana-Cena/USP, utilizando a metodologia desenvolvida por Mauricio (1999).

2.5 Análise estatística

Os dados foram avaliados quanto à normalidade e homoscedasticidade usando os testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente, implementados com os pacotes "RSTATIX" e "CAR". Para comparar os sistemas de manejo, foi aplicado o teste t de Student para amostras independentes em todas as variáveis, com anos analisados isoladamente. Em decorrência do baixo tamanho amostral, foi aplicada a análise de tamanho de efeito (d de Cohen), indicando a magnitude prática da diferença encontrada pelo teste t de Student, interpretada conforme a seguinte escala: insignificante (< 0,19), pequeno (0,20 - 0,49), médio (0,50 - 0,79), grande (0,80 - 1,29) e muito grande (> 1,30). A análise de componentes principais (PCA) também foi empregada para reduzir a dimensionalidade dos dados e destacar as principais

variáveis que influenciam o valor nutritivo da forragem nos sistemas de produção, usando os pacotes "Factominer" e "factoextra". Essa abordagem forneceu informações sobre a variabilidade entre os atributos da forrageira e sua associação com diferentes sistemas. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R (R CoreTeam, 2023).

3 RESULTADOS

3.1 Massa de forragem e composição morfológica

No primeiro ano experimental o sistema ILP apresentou menor massa de forragem por hectare durante o ano agrícola. É importante considerar que o sistema PM produziu 6 ciclos de pastejo durante cada ano, enquanto o sistema integrado produziu 2 ciclos. Ao comparar a média de produção por ciclo agrícola em cada sistema, não encontramos diferença quanto a massa de forragem entre ILP e PM nos dois anos experimentais ($p < 0.05$). Durante as avaliações, a porcentagem de folhas foi 29% inferior em PM durante o primeiro ano, e 12% durante o segundo ano. O sistema ILP obteve maior produção de folhas mas também apresentou maior porcentagem de colmo nos dois anos experimentais, sendo respectivamente 33% e 55% superiores a PM. Também foi encontrada menor porcentagem de material morto no sistema ILP durante todo o período experimental (Tabela 2).

Tabela 2. Produção e composição morfológica de capim-marandu em sistemas de integração lavoura-pecuária e pastagens em monocultivo.

Variáveis	1° ano		p-valor	d cohen
	PM	ILP		
Massa de forragem (t MS ha)	4,4 ± 0,2	4,0 ± 0,5	0.159	0.7
Lâmina foliar (%)	39,3 ± 5,0	55,2 ± 3,0	<.001	3.7
Colmo + bainha (%)	23,4 ± 0,9	34,7 ± 1,9	<.001	7.3
Material morto (%)	37,9 ± 1,7	9,1 ± 4,3	<.001	8.7
Variáveis	2° ano		p-valor	d cohen
	PM	ILP		
Massa de forragem (t MS ha)	4,7 ± 0,2	5,0 ± 1,3	0.674	0.6
Lâmina foliar (%)	46,1 ± 4,0	52,8 ± 2,1	0.011	2.0
Colmo + bainha (%)	15,5 ± 1,6	28,2 ± 3,9	<.001	4.2
Material morto (%)	31,3 ± 3,9	5,06 ± 2,1	0.001	8.2

Escala d choen: insignificante (< 0,19), pequeno (0,20 - 0,49), médio (0,50 - 0,79), grande (0,80 - 1,29) e muito grande (> 1,30). ILP: Integração lavoura-pecuária; PM: Pastagem em monocultivo. Valores das médias seguidas de desvio padrão.

3.2 Valor nutritivo e produção de metano

No primeiro ano experimental o sistema ILP apresentou maior porcentagem de proteína bruta, maior digestibilidade da matéria seca e menor porcentagem de FDN e FDA. Os resultados encontrados no primeiro ano foram similares aos observados no segundo ano experimental, onde a gramínea do sistema ILP apresentou maior proteína bruta e digestibilidade, e menor porcentagem de fibras (tabela 3). Não foram observadas diferenças quanto a produção de CH₄ entre os sistemas nos dois anos experimentais.

Tabela 3. Valor nutritivo e emissão de metano *in vitro* de capim-marandu cultivado em diferentes sistemas de produção.

Variáveis	1° ano		p-valor	d cohen
	PM	ILP		
PB (%)	13,6 ± 0,6	19,5 ± 1,1	<.001	6.3
FDN (%)	64,7 ± 0,3	56,2 ± 0,9	<.001	11.3
FDA (%)	35,4 ± 2,2	30,2 ± 0,8	0.001	3.0
DIG (%)	49,6 ± 0,9	56,5 ± 1,0	<.001	7.0
CH ₄ (ml/gDIVMO)	41,1 ± 1,2	39,6 ± 3,9	0.449	0.5
Variáveis	2° ano		p-valor	d cohen
	PM	ILP		
PB (%)	13,6 ± 0,5	18,7 ± 0,4	<.001	10.5
FDN (%)	69,5 ± 1,2	60,2 ± 3,1	<.001	3.9
FDA (%)	38,0 ± 0,9	34,5 ± 0,7	<.001	4.0
DIG (%)	51,0 ± 8,6	57,9 ± 10,7	<.001	4.3
CH ₄ (ml/gDIVMO)	42,8 ± 3,4	37,8 ± 4,7	0.099	1.1

ILP: Integração lavoura pecuária; PM: Pastagem sob monocultivo; MS: Matéria seca, PB: Proteína bruta, FDN: Fibra em detergente neutro, FDA: Fibra em detergente ácido, DIG: Digestibilidade da matéria seca *in vitro*, CH₄: Emissão de metano avaliada *in vitro*. Valores das médias seguidas de desvio padrão.

3.3 Análise de componentes principais

A análise de Componentes Principais (PCA) mostrou que os componentes PC₁ e PC₂ explicaram juntos 71,1% da variância total dos dados, sendo 51,4% atribuídos ao PC₁ e 19,7% ao PC₂ (Figura 4). Observamos uma clara separação entre os sistemas avaliados. Ao longo de PC₁ o sistema ILP foi associado a maiores concentrações de proteína bruta, maior digestibilidade, e maior proporção de colmo, no mesmo eixo o sistema PM foi associado a maior material morto, maior FDN e maior FDA, indicando menor qualidade nutricional da forragem. No eixo PC₂, ILP foi associado a maior proporção de folhas. No mesmo eixo o sistema PM apresentou maior associação com matéria seca e emissão de CH₄. De maneira geral, as variáveis que mais contribuíram para a separação dos sistemas no plano bidimensional foram ligadas à qualidade nutricional e colmo, em oposição às frações fibrosas e ao acúmulo de material morto. Esses resultados indicam que o sistema ILP tende a produzir forragens de melhor valor nutritivo, enquanto o sistema PM apresenta maior acúmulo de fibras e biomassa senescente, podendo resultar em menor eficiência alimentar e maior emissão de metano.

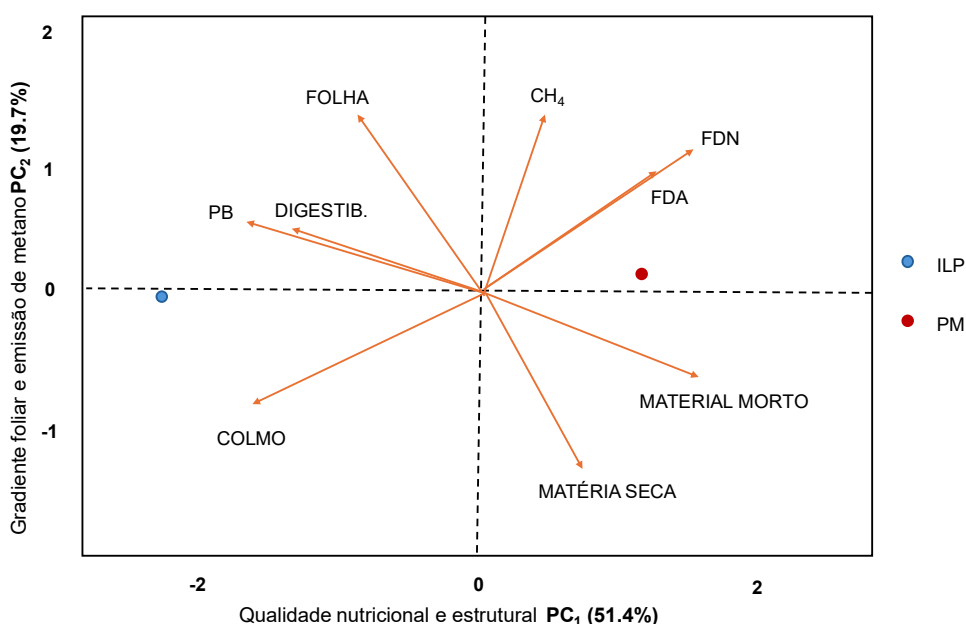


Figura 4. Análise de componentes principais (PCA) correlacionando fatores nutricionais e estruturais da planta e emissão de CH₄. ILP: Integração lavoura pecuária; PM: Pastagem monocultivo.

4 DISCUSSÃO

4.1 Massa de forragem e características morfológicas do dossel

A massa de forragem por ciclo de pastejo nos sistemas ILP e PM revelou diferenças importantes na dinâmica produtiva. A interpretação dos dados anuais deve ser feita com cautela, uma vez que o sistema ILP suportou dois ciclos de pastejo enquanto PM comportou seis ciclos. Diante disso, a massa de forragem por ciclo de pastejo se apresenta como uma métrica mais adequada para avaliar o potencial forrageiro dos sistemas.

A massa de forragem se manteve em níveis semelhantes entre os sistemas a cada ciclo de pastejo, não havendo diferença estatística entre ILP e PM, porém as características morfológicas das gramíneas apresentaram diferenças que podem impactar diretamente o desempenho animal e a eficiência produtiva. No sistema ILP a maior proporção de folhas mostrou o caráter dinâmico do sistema integrado, pois nesse tipo de manejo a renovação anual da gramínea favorece o crescimento de lâminas foliares.

A maior capacidade de emissão de folhas em gramíneas jovens, como observado no sistema ILP, pode estar ligada à dinâmica de crescimento e alocação preferencial de carboidratos não estruturais para o desenvolvimento vegetativo da planta. Em pastagens recém-implantadas as plantas iniciam seu ciclo de desenvolvimento priorizando a formação de lâminas foliares para fotossíntese, e posteriormente novos perfilhos, como estratégia de estabelecimento e colonização da área da pastagem (Shiple e Meziane, 2022).

A menor proporção de folhas encontrada no PM não indica necessariamente uma desvantagem do uso de pastagens em monocultivo, mas sim uma resposta morfofisiológica ao manejo adotado. Na pastagem em monocultivo sob lotação rotativa as plantas priorizam a alocação de recursos para órgãos de persistência em detrimento de folhas, como estratégia para tolerar o estresse recorrente de desfolhação (Moot et al., 2021). Além disso, por ser uma pastagem já estabelecida, o crescimento foliar no sistema de monocultivo também pode ter sido influenciado pelo espaço reduzido entre as touceiras, que pode ter limitado o alongamento foliar.

O pastejo no sistema integrado foi realizado durante um período de condições climáticas adversas. Nesse período normalmente ocorre a senescência de pastagens perenes em monocultivo devido ao déficit de água, temperatura, e radiação solar. Em sistemas convencionais como o PM, nessas condições, a nutrição animal depende da oferta de alimentos conservados ou suplementação adicional devido à baixa disponibilidade e qualidade da forragem. Em períodos secos, a obtenção de alta massa de folhas em ILP se torna mais relevante uma vez que as folhas constituem a parte pastejável e com maior concentração de nutrientes digestíveis.

A maior proporção de colmo encontrada no ILP em relação ao PM está também associada ao histórico do sistema. Durante a fase de consórcio com milho no sistema integrado o sombreamento induziu o alongamento dos entrenós como estratégia de escape à competição por luz (Santos Neto et al., 2023). Em condições de radiação solar ótima, o alongamento dos colmos é acentuado devido à maturidade da planta, quando há um aumento das concentrações de FDN e FDA em todo o perfilho e espessamento das paredes celulares (Nelson e Moore, 2020). Contudo, o sombreamento pode modificar essa dinâmica, promovendo a formação de colmos e nervuras menos fibrosas (Hussain et al., 2019). A maior porcentagem de matéria seca de colmo em ILP não pode ser associada ao amadurecimento da forrageira, uma vez que a menor concentração de frações fibrosas nas folhas demonstrou que os tecidos permaneceram jovens.

A menor proporção de material morto em ILP mostra mais uma vantagem do sistema integrado sob PM, pois houve maior aproveitamento da forrageira pelo animal. A principal razão para a quantidade de material morto em PM está no ciclo de renovação da gramínea. Na pastagem integrada, que é renovada anualmente, as plantas são constantemente substituídas por material jovem e ativo, o que reduz a quantidade de material morto acumulado. No monocultivo, mesmo sendo bem manejado, a ausência de uma renovação anual permite que as plantas envelheçam e acumulem material morto, que não é retirado frequentemente do sistema. O acúmulo de material morto não está diretamente relacionado à falta de qualidade da forrageira, mas pode estar relacionado à resíduos de pastejo, interceptação luminosa, ou senescência natural da planta.

Considerando a maior quantidade de folhas, colmos menos fibrosos, menor material morto em ILP, além da igualdade de produção entre ciclos dos sistemas, o ILP mesmo sob condições climáticas desfavoráveis e sombreamento no período de estiagem apresentou alto potencial produtivo.

4.2 Valor nutritivo de gramíneas

Os resultados encontrados quanto ao valor nutritivo das gramíneas mostram algumas diferenças importantes entre os sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP) e pastagem em monocultivo (PM), e reforçam o papel da dinâmica do sistema integrado na qualidade nutritiva das forragens. As diferenças encontradas são decorrentes principalmente de uma interação complexa entre fatores relacionados ao solo, à fisiologia de crescimento da forrageira e ao manejo adotado, que influenciaram a composição química das gramíneas e as emissões de metano.

A cultura da soja presente no sistema integrado, associado à adubação do milho safrinha, proporcionou a superioridade nutricional da gramínea no sistema ILP, favorecendo os valores elevados de proteína bruta. Esse resultado está intrinsecamente ligado à ciclagem acelerada de nutrientes. A introdução de soja, que é uma leguminosa fixadora de N, elevou a disponibilidade de nitrogênio no solo tanto pela fixação quanto pela decomposição de resíduos facilmente mineralizáveis (Kebede, 2021). Portanto, a pastagem no ILP se beneficiou tanto pela presença da soja no sistema, quanto da adubação aplicada ao milho, que mantiveram a fertilidade do solo e estimularam a síntese de proteínas foliares na gramínea.

Estudos demonstram que culturas como o milho, quando bem adubadas, deixam nutrientes residuais que podem aumentar a disponibilidade de N, P e K para plantas subsequentes, dispensando a aplicação direta de fertilizantes (Mateus et al., 2019). Isso explica a manutenção da PB elevada no ILP tanto no primeiro quanto no segundo ano experimental, enquanto o PM, dependente apenas da adubação nitrogenada direta, manteve valores inferiores de proteína bruta.

Apesar da menor concentração de PB no sistema PM em relação ao sistema ILP, os valores encontrados são excelentes para a produção animal, tendo em vista que o requerimento mínimo de proteína bruta para atividade ruminal é de 7% (Van

Soest, 1994). A adubação mineral, controle de pastejo, e manejo da pastagem como um todo se mostraram efetivos para o incremento do valor nutritivo da forrageira nesse sistema.

A menor concentração de fibras no ILP também reflete a dinâmica e renovação do sistema. Gramíneas em sistemas recém-implantados tendem a priorizar carboidratos não estruturais em detrimento de fibras como estratégia para maximizar o crescimento rápido sob condições de alta disponibilidade de recursos (Slewinski et al., 2012). Assim, gramíneas de primeiro ano, por possuírem folhas jovens, geralmente possuem maior valor nutritivo que gramíneas estabelecidas (Moore et al., 2020). No sistema PM a estabilidade do sistema leva a um balanço mais equilibrado entre carboidratos estruturais e não estruturais, com maior deposição de celulose e lignina nas paredes celulares quando comparado a gramíneas jovens. A maior concentração de FDA encontrada no sistema PM sustenta essa hipótese.

A maior digestibilidade e a menor concentração de fibras observadas no ILP representam um ponto favorável para a produção animal nesse sistema. Forragens com menores frações fibrosas e maior digestibilidade estão associadas à maior eficiência microbiana (Yang e Beauchemin, 2006), que associado à maior proteína bruta encontrada na forragem desse sistema, pode potencializar a síntese de proteína microbiana no rúmen, melhorando o balanço nutricional da dieta, e reduzindo a excreção de nitrogênio (Putri et al., 2021), o que minimiza perdas e impactos ambientais, além de reduzir a quantidade de alimento necessária para atingir ganhos de peso animal. Esses fatores podem diminuir a pressão sobre áreas de pastagem, e a necessidade de oferta de outras fontes de alimento.

Apesar da igualdade estatística nas emissões de CH_4 entre os sistemas ILP e PM, o tamanho de efeito avaliado através do coeficiente de cohen mostrou uma alta magnitude de diferença entre os sistemas, indicando que apesar da semelhança, o sistema ILP pode produzir menores quantidades de CH_4 quando comparado ao monocultivo de gramíneas. Na pecuária, a avaliação da emissão de metano sob a utilização de algumas estratégias de intensificação como a oferta de suplementação durante o período de seca denota que há elevação das emissões de metano por unidade de produto (Thomas et al., 2021). Assim, mesmo não havendo diferença quanto a emissão de CH_4 entre os sistemas, o ILP apresentou-se de forma mais

sustentável, onde houve maior ganho produtivo, que não foi acompanhado de maior emissão de metano.

4.3 Análise de componentes principais

A análise de Componentes Principais (PCA) associou todos os fatores analisados e mostrou uma clara diferenciação nutricional e morfológica da forragem entre os sistemas de integração lavoura pecuária e pastagem em monocultivo. O componente PC1, responsável por 51,4% da variância total, destacou uma separação onde o ILP se associou a variáveis ligadas à qualidade nutricional enquanto o PM foi correlacionado com variáveis de menor valor nutritivo.

A associação do ILP com maior digestibilidade, proteína bruta, e maior proporção de colmo ao longo do PC1 é um resultado aparentemente contraditório, uma vez que gramíneas com alta proporção de colmo são comumente associadas à menor digestibilidade. Neste estudo essa associação positiva ao longo de PC₁ é justificada pelo sombreamento durante o consórcio com milho que induziu o alongamento dos entrenós, e a elevada fertilidade do solo suprimiu a lignificação desses colmos, mantendo alta a digestibilidade da gramínea. Já no PM, a maior proporção de material morto e fibras no eixo PC1 sugere uma resposta adaptativa ao pastejo e priorização das estruturas de persistência, um padrão observado em pastagens tropicais já estabelecidas.

Apesar da associação de PM à fatores de menor valor nutritivo, a gramínea em monocultivo apresentou resultados superiores ao esperado de 8% a 13% para o sistema (SOESP, 2024). A possibilidade de obter forragem de alta qualidade em pastagem de longa duração foi anteriormente relatada por Privalova (2022), porém essa perenidade é dependente principalmente do manejo adotado. A área de PM está estabelecida a mais de 20 anos e não passou por renovação, sendo manejada como pastagem nominal durante muitos anos, justificando a associação de maior fração fibrosa e maior material morto a esse sistema.

No eixo PC2 a maior associação do ILP com folhas reforça o papel do manejo integrado na alocação de energia para produção de estruturas fotossinteticamente ativas. Gramíneas jovens, em solos com alta disponibilidade de nutrientes, manejada com intervalos de descanso entre pastejos, permitem a rápida recomposição de

meristemas apicais, favorecendo a produção de novas folhas (Hendrickson e Olson, 2006). A dinâmica de crescimento de folha está diretamente relacionada ao padrão de desenvolvimento inicial da gramínea em sistemas recém-implantados, nos quais a prioridade da planta é direcionar recursos para a fotossíntese, conforme observado anteriormente. À medida que a gramínea se estabelece e as reservas energéticas são restabelecidas, a prioridade metabólica gradualmente se desloca para o perfilhamento, garantindo a densidade populacional de perfilhos e a perenidade da pastagem.

5 CONCLUSÃO

Este estudo reforça o potencial dos sistemas integrados como estratégia para conciliar produtividade na pecuária brasileira. A integração lavoura-pecuária ao produzir gramínea com maior valor nutritivo, surge como um sistema de produção, uma alternativa eficiente para superar a sazonalidade da produção forrageira de pastagens em monocultivo no período de condições climáticas desfavoráveis.

A melhoria na qualidade da forragem no sistema ILP promove maior digestibilidade e sinaliza uma menor produção de metano, podendo tornar o sistema integrado como uma forma de manejo eficiente por apresentar menor impacto ambiental por quilo de produto final. Isso evidencia a importância de manejos que abordem o sistema de produção animal avaliando as respostas produtivas, nutricionais e ambientais de forma integrada como estratégia para mitigação de CH₄.

6 REFERÊNCIAS

Abdul Khalil, H. P. S.; Hossain, M. D. S., Rosamah, E., Azli, N. A., Saddon, N., Davoudpoura, Y., Islam, Md. Nazrul; Dungani, Rudi. (2016). The role of soil properties and it's interaction towards quality plant fiber: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, 43, 1006-1015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.099>.

Barrière, Y., Guillet, C., Goffner, D., Pichon, M. (2003). Genetic variation and breeding strategies for improved cell wall digestibility in annual forage crops. A review. **Animal Research**, 52(3), 193-228. <http://dx.doi.org/10.1051/animres:2003018>.

Detmann, E., Souza, M. A., Valadares Filho, S. C., Queiroz, A. C., Berchielle, T. T., Saliba, E. O. S., Cabral, L. S., Pina, D. S., Ladeira, M. M., Azevedo, J. A. G. **Métodos para análise de alimentos**. 1st Ed. Suprema; Visconde do Rio Branco, MG, Brazil: 2012.

Eugène, M., Klumpp, K., Sauvant, D. (2021). Methane mitigating options with forages fed to ruminants. **Grass And Forage Science**, 76(2), 196-204. <http://dx.doi.org/10.1111/gfs.12540>.

Geisseler, D., Horwath, W. R., Joergensen, R. G., Ludwig, B. (2010) Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms – A review. **Soil Biology And Biochemistry**, 42(12), 2058-2067. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.08.021>.

Hendrickson J, Olson, B. (2006). Understanding Plant Response to Grazing. Targeted Grazing: A Natural Approach to Vegetation Management and Landscape Enhancement. **Centennial**, 32-39. Acesso em 15 de março de 2025. Disponível em: https://rangelands.org/wp-content/uploads/2014/03/chapter_4_targeted_grazing.pdf.

Hussain, S., Iqbal, N., Pang, T., Khan, M. N., Liu, W. G., Yang, W. Y. (2019). Weak stem under shade reveals the lignin reduction behavior. **Journal Of Integrative Agriculture**, 18(3), 496-505. [http://dx.doi.org/10.1016/s2095-3119\(18\)62111-2](http://dx.doi.org/10.1016/s2095-3119(18)62111-2).

Janssen, P. H. (2010) Influence of hydrogen on rumen methane formation and fermentation balances through microbial growth kinetics and fermentation thermodynamics. **Animal Feed Science and Technology**, 160(1-2), 1-22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2010.07.002>.

Jayasinghe, P., Ramilan, T., Donaghy, D. J., Pembleton, K. G., Barber, D. G.(2022). Comparison of Nutritive Values of Tropical Pasture Species Grown in Different Environments, and Implications for Livestock Methane Production: a meta-analysis. **Animals**, 12(14), 1806. <http://dx.doi.org/10.3390/ani12141806>.

Kebede, E. (2021). Contribution, utilization, and improvement of legumes-driven biological nitrogen fixation in agricultural systems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, 5, 767998. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.767998>

Machebe, N. S., Ikeh, N. E., Uzochukwu, I.E., Baiyeri, P. K. (2023). Livestock-crop interaction for sustainability of agriculture and environment. **Sustainable agriculture and the environment**, 13, 339-394. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-90500-8.00011-7>.

MapBiomias - **Mapeamento Anual de Cobertura e Uso da Terra no Brasil** - Coleção 9, acessado em 03 de março de 2025 através do link: https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2024/12/Factsheet-Pastagem_C9_05.12_v3.pdf

Mateus, G. P., Crusciol, C. A. C., Pariz, C. M., Costa, N. R., Borghi, E., Costa, C., Martello, J. M., Castilhos, A. M., Franzluebbbers, A. J., Cantarella, H. (2019). Corn intercropped with tropical perennial grasses as affected by sidedress nitrogen application rates. **Nutrient Cycling In Agroecosystems**, 116(2), 223-244. <http://dx.doi.org/10.1007/s10705-019-10040-1>.

Mauricio, R. M., Mould, F. L., Dhanoa, M. S., Owen, E., Channa, K. S., Theodorou, M. K. (1999). A semi-automated in vitro gas production technique for ruminant feedstuff evaluation. **Animal Feed Science And Technology** 79(4), 321-330. [http://dx.doi.org/10.1016/s0377-8401\(99\)00033-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0377-8401(99)00033-4).

- Mokhele, B., Zhan, X., Yang, G., Zhang, X. (2012). Review: nitrogen assimilation in crop plants and its affecting factors. **Canadian Journal of Plant Science**, 92(3), 399-405. <http://dx.doi.org/10.4141/cjps2011-135>.
- Moore, K. J., Curtiss, C. F., Lenssen, A. W., Fales, S. L. (2020). Factors Affecting Forage Quality. *In: Forages: **The Science of Grassland Agriculture***, 2, 701-717. <https://doi.org/10.1002/9781119436669.ch39>
- Moot, D., Black, A., Lyons, E., Egan, L., Hofmann, R. (2021). Pasture resilience reflects differences in root and shoot responses to defoliation, and water and nitrogen deficits. *Nzga: **Research and Practice Series***, 17, 71-80. <http://dx.doi.org/10.33584/rps.17.2021.3472>.
- Moraes, A.; Carvalho, P. C. F.; Anghinoni, I.; Lustosa, S. B. C.; Costa, S. E. V. G. A.; Kunrath, T. R. (2014) Integrated Crop–Livestock Systems In The Brazilian Subtropics. **European Journal of Agronomy**, 57, 4-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2013.10.004>.
- Nelson, C ., Moore, K. J. (2020). Grass Morphology. *In: Moore, K. J.; Collins, M.; Nelson, C. J., Redfear, D. D. (2020). Forages: **The Science of Grassland Agriculture***. 7. ed. A: Wiley, 2020. Cap. 2. p. 23-49.
- Privalova, K. (2022). Botanical composition and quality of pasture forage using different-age grass stands. **Multifunctional Adaptive Feed Production**, 27(75), 113-117. <http://dx.doi.org/10.33814/mak-2022-27-75-113-117>.
- Putri, E. M., Zain, M., Warly, L., Hermon, H. (2021) Effects of rumen-degradable-to-undegradable protein ratio in ruminant diet on in vitro digestibility, rumen fermentation, and microbial protein synthesis. **Veterinary World**, 14(3), 640-648. <http://dx.doi.org/10.14202/vetworld.2021.640-648>.
- Santos Neto, C. F., Silva, R. G., Maranhão, S. R., Cavalcante, A. C. R., Macedo, V. H. M., Cândido, M. J. D. (2023). Shading effect and forage production of tropical grasses in Brazilian semi-arid silvopastoral systems. **Agroforestry Systems**, 97(6), 995-1005. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-023-00843-1>.
- Shiple, B.; Meziane, D. (2002). The balance-growth hypothesis and the allometry of leaf and roots biomass allocation. **Functional Ecology**, 16, 326-31.
- Slewinski, T. L. (2012). Non-structural carbohydrate partitioning in grass stems: a target to increase yield stability, stress tolerance, and biofuel production. **Journal Of Experimental Botany**, 63(13), 4647-4670. <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/ers124>.
- Tedeschi, L. O; Adams, J. M; Vieira, R. A. M. (2023). Forages and Pastures Symposium: revisiting mechanisms, methods, and models for altering forage cell wall utilization for ruminants. **Journal Of Animal Science**, 101, 1-21. <http://dx.doi.org/10.1093/jas/skad009>.
- Thomas, D.T.; Beletse, Y.G.; Dominik, S.; Lehnert, S.A. (2021). Net protein contribution and enteric methane production of pasture and grain-finished beef cattle supply chains. **Animal**, 15(12), 100392. <http://dx.doi.org/10.1016/j.animal.2021.100392>.
- Van Soest, P. J. (1994) **Feeding strategies, taxonomy, and evolution**. *In: Nutritional Ecology of the Ruminant*, 2nd ed., pp. 22–39.

Yang, W. Z.; Beauchemin, K. A. (2006) Increasing the Physically Effective Fiber Content of Dairy Cow Diets May Lower Efficiency of Feed Use. **Journal Of Dairy Science**, 89(7), 2694-2704. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(06\)72345-1](http://dx.doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(06)72345-1).

CAPÍTULO 4 - Implicações do sistema integrado soja-milho-capim na saúde do solo, sustentabilidade e lucratividade

1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A busca por sistemas agropecuários que conjuguem alta produtividade, saúde ambiental e viabilidade econômica é um desafio para a agricultura tropical. O sistema integrado lavoura-pecuária (ILP) com arranjo integrado de soja, milho e capim é uma solução viável, não apenas por elevar a produtividade por hectare, mas por regenerar solos degradados e reduzir a dependência de insumos externos. Este capítulo demonstra como a sinergia entre culturas e pastagem no ILP cria um ciclo onde ganhos agronômicos e ambientais se traduzem em lucratividade para o produtor.

A produtividade por área no ILP é impulsionada pela eficiência no uso dos recursos naturais e pela complementariedade biológica entre as espécies. A soja, plantada no verão fixa nitrogênio atmosférico que pode variar entre 1 a 3 kg por dia (Córdova et al., 2016) por meio da simbiose com bactérias *Rhizobium*, reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados em até 60% (Salvagiotti et al., 2008). Esse nitrogênio residual é aproveitado pelo milho safrinha, que quando cultivado no outono sobre a palhada da soja, alcança produtividades de 4–6 t ha⁻¹ (Brambilla et al., 2009; Cunha et al., 2019). A produção de milho na entressafra em sistema integrado pode ser apenas 5,6% inferior à produção de milho em monocultivo na mesma época (Souza et al., 2024). Após a colheita do milho, o capim-Marandu ocupa a área da pastagem e utiliza os nutrientes remanescentes, se beneficiando da palhada das culturas, e produz cerca de 8 t de matéria seca ha⁻¹ ano⁻¹, com alto teor de proteína bruta. A área destinada à integração lavoura pecuária é lucrativa para o produtor que possui criação bovina na propriedade, trazendo economia na compra de alimentos conservados, uma vez que haverá pastagem para os animais durante o período seco; havendo ainda a possibilidade do aluguel da área para criação animal no curto período, chamado de boi safrinha. Essa sequência garante três safras por ano para o produtor (soja, milho e capim), transformando a mesma área em um sistema multifuncional que gera grãos, carne e serviços ecossistêmicos.

A saúde do solo é a base da produtividade em sistemas integrados. A rotação de culturas rompe ciclos de pragas e doenças, enquanto a diversidade de raízes melhora a estrutura física do solo, aumentando a porosidade e a infiltração de água. A matéria orgânica, essencial para a fertilidade, alcança níveis elevados graças à decomposição constante de palhada e raízes, atuando como um reservatório e liberando nutrientes de forma gradual tanto no período das águas quanto durante a seca (Malo et al., 2021). O resultado é uma pastagem com folhas jovens e colmos menos lignificados, e com alta digestibilidade, favorecendo o ganho de peso animal.

O ILP é também um sistema economicamente viável para o produtor. Pode-se inferir que os resultados financeiros decorrentes da implantação da ILP são, em relação ao monocultivo, menos vulneráveis a variações de mercado devido a integração de atividades agrícolas e pecuária, ocasionando melhor aproveitamento dos benefícios da diversificação e redução de riscos (Lazzarotto et al., 2009). A venda de soja e milho gera fluxo de caixa imediato enquanto a pecuária agrega com a venda de gado engordado em ciclos mais curtos ou devido ao arrendamento da pastagem. O tempo de retorno para o capital investido pode ser obtido a partir do 9º mês após a implantação do sistema (Faleiro et al., 2017).

É necessário considerar ainda a redução de custos nesse sistema. A soja cultivada em sistema de rotação tem potencial para substituir pelo menos 100 kg ha⁻¹ de aplicação de nitrogênio devido a fixação biológica (Yan et al., 2024). Considerando que a soja pode exportar cerca de 80 kg de N por hectare (Crispino et al., 2001) pode haver economia de 20 kg de nitrogênio por hectare para o estabelecimento do milho, uma economia de 67% em fertilização nitrogenada. Além disso, a pastagem pode dispensar a aplicação de nitrogênio em decorrência do efeito residual da fertilização das culturas anuais, significando uma economia de 100% na adubação da pastagem.

A longo prazo o ILP se consolida como um investimento estratégico. A implantação do sistema integrado exige um investimento inicial, e o estudo de viabilidade econômica de um sistema integrado composto por soja seguida de milho safrinha + pastagem feito por Faleiro et al., (2017) indica que após 5 anos o lucro do produtor é superior em mais de 100% em relação ao valor investido para implantação do sistema, sendo possível a obtenção do primeiro retorno do capital investido a partir do 9º mês após a implantação do sistema.

Em síntese, o sistema integrado soja-milho-capim redefine a produtividade agropecuária, provando que é possível produzir mais alimento, em menos área, com menor impacto ambiental. Para o produtor, a transição para o ILP não é apenas uma escolha técnica, mas uma estratégia de produção em um cenário de mudanças climáticas, custos crescentes e demandas por sustentabilidade. Enquanto o monocultivo sujeita a produção para uma espiral dependência, o ILP oferece um caminho de regeneração onde cada hectare se torna um ecossistema produtivo, resiliente e economicamente viável.

2 REFERÊNCIAS

- Brambilla, J. A., Lange, A., Buchelt, A. C., Massaroto, J. A. (2009). Produtividade de Milho Safrinha no Sistema de Integração Lavoura-Pecuária, na Região de Sorriso, Mato Grosso. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, 8(3), 263-274. <http://dx.doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v8n3p263-274>.
- Córdova, S. C., Castellano, M. J., Dietzel, R., Licht, M. A., Togliatti, K., Martinez-Feria, R., Archontoulis, S. V. (2019). Soybean nitrogen fixation dynamics in Iowa, USA. **Field Crops Research**, 236, 165-176. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2019.03.018>.
- Crispino, C. C., Franchini, J. C., Moraes, J. Z., Sibaldelle, R. N. R., Loureiro, M. F., Santos, E. N., Campo, R. J., Hungria, M. (2001). **Adubação nitrogenada na cultura da soja**. Londrina: Embrapa Soja; 2001. (Comunicado técnico, 75).
- Faleiro, M., Rosa, D., Silva, L., Silva, A., Araújo, M. (2017). Análise econômica da implantação de soja com sucessão de milho e ILP em uma propriedade rural no município de Orizona, Goiás. **Enciclopédia Biosfera**, 14(25), 92-101. http://dx.doi.org/10.18677/encibio_2017a9.
- Lazzarotto, J. J., Santos, M. L., Lima, J. E. (2010). Viabilidade financeira e riscos associados à integração lavoura-pecuária no estado do Paraná. **Organizações Rurais e Agroindustriais**, 12, (1), 113-130.
- Malo, M.; Sarkar, A. (2021). **Soil Biological Diversity: Key to the Function of Agricultural Systems**. In: Porte, S. S. Latest trends in soil science, cap. 1., 01-22.
- Salvagiotti, F.; Cassman, K.G.; Specht, J. E.; Walters, D.T.; Weiss, A.; Dobermann, A. (2008). Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: a review. **Field Crops Research**, 108, (1), 1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2008.03.001>
- Souza, L. F. N., Ciampitti, I. A., Fernandez, J. A., Favarin, J. L., Oliveira, S. M. (2024). Maize-Brachiaria grass intercropping: a meta-analysis of major productivity drivers in Brazil. **Field Crops Research**, 306, 109205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109205>.

Yan, C., Yang, Y., Song, J., Shan, F., Lyu, X., Yan, S., Wang, C., Song, Q., Ma, C. (2024). Analysis of the beneficial effects of prior soybean cultivation to the field on corn yield and soil nitrogen content. **Frontiers In Plant Science**, 15(1), 1413507. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2024.1413507>.