UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

ESTOQUES DE CARBONO EM SOLOS DE SISTEMAS INTEGRADOS E CONSORCIADOS DE PASTAGEM NA REGIÃO DA MATA ATLÂNTICA BRASILEIRA

Isabella Vilalvo Moraes
Orientadora: Profa. Dra. Ana Cláudia Ruggieri
Coorientador: Ms. Natan Lima Abreu

Jaboticabal 2º Semestre/2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

ESTOQUES DE CARBONO EM SOLOS DE SISTEMAS INTEGRADOS E CONSORCIADOS DE PASTAGEM NA REGIÃO DA MATA ATLÂNTICA BRASILEIRA

Isabella Vilalvo Moraes
Orientadora: Profa. Dra. Ana Cláudia Ruggieri
Coorientador: Ms. Natan Lima Abreu

Trabalho apresentado à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP,
Campus de Jaboticabal, para graduação
em Engenharia Agronômica.

Jaboticabal 2º Semestre/2025

V696e

Vilalvo Moraes, Isabella

Estoques de carbono em solos de sistemas integrados e consorciados de pastagem na região da Mata Atlântica Brasileira / Isabella Vilalvo Moraes. -- Jaboticabal, 2025

40 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agronômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientadora: Ana Claúdia Ruggieri

Coorientador: Natan Lima Abreu

1. Estoque de carbono. 2. Sistemas integrados. 3. Sistemas consorciados. 4. Mata Atlântica. I. Título.

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

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" Câmpus Jaboticabal

NOME COMPLETO DO AUTOR: Isabella Vilalvo Moraes

TÍTULO DO TRABALHO ACADÊMICO: Estoques de carbono em solos de sistemas integrados e consorciados de pastagem na região da mata atlântica brasileira.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agronômica.

Orientador: Prof. Dr. Ana Claúdia Ruggieri
Coorientador: Ms. Natan Lima Abreu

Área de Concentração: Forragicultura e pastagens

Data da defesa: 27/08/2025

(X) Aprovado
( ) Reprovado

Banca Examinadora:

Ms. Natan Lima Abreu
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Camila Eduarda Souza de Sousa
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Gilmar Cotrin de Lima
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: 03/09/2025

Prof. Dr. José Maurício Barbanti Duarte
Chefe do Departamento

Scanned with CamScanner

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus, aos meus pais que sempre me apoiaram e não mediram esforços para me fazerem chegar aonde estou e aos meus professores por todos os ensinamentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e Nossa Senhora Aparecida por toda proteção e força durante minha trajetória na faculdade e toda vida. Por me darem discernimento para seguir nos melhores caminhos e sempre seguir a vontade divina. Além disso, agradeço a proteção e por ter minha fé como meu eterno guia.

Agradeço meu pai, Juvenal Dias Moraes, por ser meu maior exemplo de ser humano e fazer de tudo para me proporcionar uma vida feliz. Por todo amor e tempo doado e por ser meu porto-seguro e melhor amigo.

Agradeço a minha mãe, Mariluz Gasques Vilalvo, por todo apoio durante minha vida e pelas orações, que me ajudaram a chegar aonde estou. Por todos os conselhos e pelo tempo passado juntas.

Á minha orientadora, Ana Cláudia Ruggieri por toda paciência, carinho, acolhimento e ensinamento passado. Professora, você foi essencial em minha trajetória e não mediu esforços para poder me ajudar e estar sempre presente. Os conhecimentos adquiridos a campo e em laboratório, serão levados sempre comigo.

Ao meu coorientador Natan Lima de Abreu por todo tempo dedicado aos meus ensinamentos, pesquisas e projetos. Por toda ajuda, paciência e apoio durante o meu projeto e por sempre estar presente me auxiliando e ajudando em todos os aspectos.

Á república Mete Marcha por ser minha família em Jaboticabal e me permitirem viver anos de alegria e muita felicidade, dividindo a vida com meninas mais que especiais e que levarei para toda minha vida. Falar na Mete Marcha é falar em amor, união, acolhimento e companheirismo.

Aos meus avós, Floraci e Arlindo que sempre me apoiaram durante a faculdade e se mostraram presentes. Obrigada por tanto carinho.

Aos meus companheiros e amigos da faculdade, pela ajuda e pelo companheirismo nas horas boas e ruins. Obrigada pelos momentos vividos, horas de estudos e muitas histórias guardadas na memória e no coração.

Aos meus amigos de forragem, agradeço a grande amizade, ajuda e companhia durante todos os dias.

A todos os professores que passaram pela minha vida acadêmica, em especial aos da FCAV, que contribuíram de forma genuína para meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pela concessão da bolsa de iniciação durante a execução do projeto.

A todos que me ajudaram de alguma forma, deixo aqui o meu muito obrigada. Vocês foram essenciais para que tudo isso se torna-se a realização de um grande sonho.

SUMÁRIO

RESUMO.....VI
ABSTRACT.....VII
1. INTRODUÇÃO..... 6
2. REVISÃO DE LITERATURA 8
2.1. Importância dos estoques de carbono no solo e sua relação com a 8
mitigação das mudanças climáticas 8
2.2. Características dos sistemas integrados e consorciados de pastagem 10
2.3. Influência dos sistemas integrados sobre os estoques de carbono no solo na Mata Atlântica..... 12
3. MATERIAIS E MÉTODOS 14
3.1.Área e tratamentos..... 14
3.2. Descrição das áreas 15
3.3. Amostragem do solo..... 16
3.4. Variáveis analisadas 19
3.5. Análise estatística 19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 20
5. CONCLUSÃO..... 29
6. REFERÊNCIAS 30

RESUMO

ESTOQUES DE CARBONO EM SOLOS DE SISTEMAS INTEGRADOS E CONSORCIADOS DE PASTAGEM NA REGIÃO DA MATA ATLÂNTICA BRASILEIRA

A intensificação sustentável da produção agropecuária exige sistemas de manejo que conservem o solo e promovam o sequestro de carbono. Nesse contexto, os sistemas integrados e consorciados de pastagem, como a Integração Lavoura Pecuária (ILP) e o sistema silvipastoril, têm se destacado como alternativas promissoras para a recuperação de áreas degradadas e mitigação das mudanças climáticas. O objetivo foi avaliar a concentração e estoques de carbono em diferentes sistemas: Monocultivo (MON), Mata Nativa (MN), Silvipastoril (SIL), Consórcio (CON) e Integração lavoura-pecuária (ILP) na Mata Atlântica. Foram coletadas amostras de solo em diferentes profundidades (0-5; 5-10; 10-20 e 20-30 cm) em 5 repetições, para análise de estoques de carbono, carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado a minerais (CAM) e índice de manejo do carbono (IMC). Os resultados mostraram que o sistema monocultivo apresentou os maiores estoques de COT, COP e CAM em relação ao SIL, resultado atribuído à ausência de revolvimento do solo, elevado aporte de resíduos vegetais e tempo de implantação da área. O sistema silvipastoril teve os menores valores em relação ao MON em virtude do tempo de implantação da área e dessecação feita antes da implantação do capim, além da menor cobertura vegetal. O tipo de manejo, a textura do solo e o tempo de implantação foram fatores determinantes na dinâmica do carbono no solo nos sistemas avaliados, sendo que sistemas diversificados como ILP e consórcio mostraram-se com potencial para maior estabilidade e sustentabilidade dos agroecossistemas a médio e longo prazo.

Palavras-chave: sustentabilidade agrícola, sequestro de carbono, agroecossistemas.

SUMMARY

SOIL CARBON STOCKS IN INTEGRATED AND INTERCROPPED PASTURE SYSTEMS IN THE BRAZILIAN ATLANTIC FOREST REGION

The sustainable intensification of agricultural and livestock production requires management systems that conserve soil and promote carbon sequestration. In this context, integrated and intercropped pasture systems, such as Crop-Livestock Integration (CLI) and the silvopastoral system, have stood out as promising alternatives for the recovery of degraded areas and mitigation of climate change. The objective was to evaluate carbon concentration and stocks in different systems: Monoculture (MON), Native Forest (NF), Silvopastoral (SIL), Intercropping (INT), and Crop-Livestock Integration (CLI) in the Atlantic Forest biome. Soil samples were collected at different depths (0–5, 5–10, 10–20, and 20–30 cm) in 5 replicates to analyze carbon stocks, total organic carbon (TOC), particulate organic carbon (POC), mineral-associated organic carbon (MAOC), and the carbon management index (CMI). The results showed that the monoculture system had the highest TOC, POC, and MAOC stocks compared to the SIL system. This result is attributed to the absence of soil disturbance, high input of plant residues, and the time since the area was established. The silvopastoral system had the lowest values compared to MON due to the time since establishment, the desiccation carried out before grass planting, and lower vegetation cover. The type of management, soil texture, and time since establishment were determining factors in the carbon dynamics in the evaluated systems. Diversified systems such as CLI and intercropping showed potential for greater stability and sustainability of agroecosystems in the medium and long term.

Keywords: agricultural sustainability, carbon sequestration, agroecosystems.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas integrados e consorciados representam alternativas para uma produção de carne mais sustentável e podem contribuir para os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) propostos pela ONU na agenda 2030 (ONU, 2022), assim como para as metas de redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) assumidas pelo Brasil na COP26 em 2021. Entre os sistemas integrados adotados no Brasil, destacam-se o sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) e o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF).

O ILP intercala o plantio de culturas agrícolas com a sucessão por pastagem. Além disso, a troca de uma cultura para outra é realizada com o auxílio de dessecantes e sob plantio direto (Embrapa, 2020). O plantio direto empregado no sistema ILP reduz, a longo prazo, as perdas nos estoques de C em até 26% em comparação a um sistema de cultivo convencional (Medeiros et al., 2022). Isso ocorre devido à menor perturbação do solo e à menor exposição de agregados de C, tornando a matéria orgânica menos susceptível à oxidação no solo (Tavanti et al., 2020). O sistema ILP, quando associado ao plantio direto, também diminui o tempo de exposição do solo ao intemperismo ambiental, reduzindo a oxidação do C já fixado no sistema (Brewer; Gaudin, 2020). Assim, o sistema ILP pode contribuir para o aumento dos estoques de C orgânico (SCO) no solo (Alves et al., 2020).

O sistema ILPF combina os componentes lavoura, pastagem e silvicultura (Buller et al., 2014). O sistema silvipastoril é um dos modelos de ILPF e combina, em uma mesma área, pastagens, animais e árvores (Embrapa, 2023). É uma alternativa para a recuperação de pastagens, diversificação da renda e aumento da produtividade da propriedade (Embrapa, 2016). Além disso, esse sistema também

impacta positivamente nos SCO do solo, combinando aumento da produtividade e prestação de serviços ambientais (Gil et al., 2015).

Os sistemas consorciados leguminosas/gramíneas podem ser uma alternativa para uma produtividade mais eficiente e até para a recuperação da pastagem, pois podem contribuir com o aumento da forragem (impedindo ou reduzindo o decréscimo natural da produtividade da gramínea ao longo dos anos). Podem gerar incremento de N e C no solo, além de contribuírem na massa de forragem, tornando-a mais nutritiva (Dalal; Thornton; Cowie, 2013). Outro ponto é que a adoção de leguminosas em consórcio reduz e/ou elimina a necessidade de fertilização nitrogenada, o que pode diminuir as emissões de óxido nitroso (Mahama et al. 2020).

O monocultivo quando bem manejado, pode contribuir positivamente para o aumento dos estoques de carbono no solo e uma melhoria da sua estrutura. Segundo Wesley et al., 2024, sistemas compostos majoritariamente por gramíneas forrageiras perenes, mesmo sob monocultivo, promoveram aumentos significativos nos estoques de carbono tanto na camada superficial quanto no subsolo. Isso se deve principalmente ao crescimento profundo e abundante das raízes dessas espécies, que, ao se decomporem, contribuem para a formação de matéria orgânica estável.

As gramíneas liberam exsudatos radiculares e, ao morrerem, deixam um grande volume de resíduos orgânicos no perfil do solo. Essa biomassa radicular morta é rica em compostos orgânicos que podem ser parcialmente decompostos pela microbiota e posteriormente estabilizados, especialmente na forma de carbono orgânico associado a minerais (CAM) a fração mais resistente à decomposição e com maior tempo de residência no solo (Carvalho et al., 2023).

O objetivo do trabalho foi avaliar a concentração e estoques de carbono em diferentes sistemas: Monocultivo, Mata Nativa, Silvipastoril, Consórcio e Integração lavoura-pecuária na Mata Atlântica.

As hipóteses seriam de que os sistemas consorciados promoveriam maiores estoques de carbono no solo e que o tempo de implantação e o manejo dos sistemas afetariam diretamente a capacidade de sequestro e estabilização do carbono no solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Importância dos estoques de carbono no solo e sua relação com a mitigação das mudanças climáticas

O aquecimento global é um dos maiores desafios ambientais do século XXI, impulsionado principalmente pelo aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxidos de nitroso (N_2O). O setor agropecuário tem papel relevante tanto nas emissões quanto no potencial de mitigação desses gases, especialmente por meio do manejo do solo e da vegetação (IPCC, 2022; FAO, 2021). Estratégias que promovem o sequestro de carbono no solo são essenciais para limitar o aumento da temperatura global, conforme metas estabelecidas no Acordo de Paris e nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2022; Euclides *et al*., 2020).

O carbono orgânico do solo (COS) representa o maior reservatório de carbono terrestre, superando os estoques presentes na vegetação e na atmosfera. A importância do COS para a mitigação das mudanças climáticas é amplamente

reconhecida, pois o solo pode atuar como sumidouro ou fonte de CO_2, dependendo do manejo e do uso da terra. O COS está distribuído em diferentes compartimentos do solo, como macro e microagregados, cuja estabilidade física é fundamental para a proteção do carbono contra a decomposição microbiana e, consequentemente, para o sequestro de carbono de longo prazo (Lal, 2004; Paustian *et al*., 2019; Macedo *et al*., 2025).

A formação e estabilização dos agregados do solo, influenciada por fatores físicos, químicos e biológicos, limita o acesso dos microrganismos à matéria orgânica mais recalcitrante, protegendo o carbono. A conversão de áreas naturais para agricultura, especialmente em regiões tropicais, pode resultar em perdas expressivas de carbono do solo, enquanto práticas conservacionistas e sistemas integrados promovem o acúmulo e a estabilização desse carbono (Minasny *et al*., 2017; Tanaka *et al*., 2025).

O aumento do COS por meio de práticas de manejo sustentável reduz a concentração atmosférica de CO_2 e pode compensar parte das emissões do setor agropecuário. Estratégias como plantio direto, integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), agroflorestas e consórcios com leguminosas têm se mostrado eficazes para aumentar o sequestro de carbono, melhorar a saúde do solo e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas (Paustian *et al*., 2019; Casagrande *et al*., 2023; Oliveira *et al*., 2024).

De acordo com Cotrufo *et al*. (2021), o carbono do solo pode ser encontrado principalmente em duas formas de matéria orgânica: a fração particulada (COP) e a fração associada a minerais (CAM). O carbono orgânico particulado (COP) é composto por resíduos vegetais e microbianos pouco decompostos, geralmente presentes em agregados maiores e mais facilmente acessíveis aos

microrganismos. Essa fração é considerada lábil, pois responde rapidamente às mudanças no manejo do solo, sendo importante para a ciclagem de nutrientes e a manutenção da fertilidade.

Já o carbono orgânico associado a minerais (CAM) costuma estar ligado a partículas de argila e silte, formando complexos organo-minerais mais estáveis e protegidos contra a decomposição. Essa fração representa o principal reservatório de carbono de longo prazo no solo, sendo menos sensível a mudanças rápidas no uso da terra, mas fundamental para o sequestro de carbono e a resiliência dos sistemas agrícolas (Six *et al*., 2022; Macedo *et al*., 2025). A formação do CAM depende da interação entre matéria orgânica e minerais do solo, processo favorecido por práticas que aumentam o aporte de resíduos vegetais e a atividade biológica.

A principal vantagem do COP é sua rápida resposta ao manejo, servindo como indicador precoce de mudanças na qualidade do solo. Por outro lado, o CAM, por ser mais estável, garante a manutenção dos estoques de carbono ao longo do tempo, sendo essencial para estratégias de mitigação das mudanças climáticas (Cotrufo *et al*., 2021; Six *et al*., 2022). A avaliação dessas duas frações permite compreender tanto os efeitos imediatos quanto os de longo prazo das práticas de manejo sobre o carbono do solo.

2.2. Características dos sistemas integrados e consorciados de pastagem

Segundo Oliveira *et al*. (2024) e Casagrande *et al*. (2023), os sistemas integrados de produção agropecuária, como a integração lavoura-pecuária (ILP), integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e os consórcios forrageiros, têm ganhado destaque como alternativas sustentáveis para intensificação da produção

agrícola e pecuária no Brasil. Esses sistemas combinam culturas agrícolas, pastagens e árvores em uma mesma área ou em sucessão temporal, buscando sinergias produtivas, maior eficiência no uso dos recursos naturais e melhoria da qualidade do solo.

Euclides *et al*. (2020) ressalta que no ILP, há alternância ou consórcio de culturas e pastagens, promovendo diversificação, aumento da produtividade e recuperação de áreas degradadas. O ILPF agrega o componente arbóreo, trazendo benefícios ambientais adicionais, como sombreamento, aumento da biodiversidade e maior proteção do solo. Os consórcios forrageiros, que misturam gramíneas e leguminosas, favorecem o aporte de biomassa, a ciclagem de nutrientes e a fixação biológica de nitrogênio, reduzindo a dependência de fertilizantes químicos.

Entre os principais benefícios dos sistemas integrados estão a recuperação de pastagens degradadas, o aumento da produtividade animal e vegetal, a melhoria da fertilidade e da estrutura do solo, o incremento da biodiversidade do solo e da atividade microbiana, além da maior estabilidade dos agregados (Tanaka *et al*., 2025; Macedo *et al*., 2025). A adoção de sistemas integrados resulta em maior aporte de resíduos vegetais e raízes profundas, promovendo a formação de macro e microagregados estáveis, fundamentais para a proteção do carbono do solo. Práticas como o plantio direto e a rotação de culturas reduzem a mobilização do solo, diminuindo a erosão e aumentando a resiliência do sistema produtivo. De acordo com Casagrande *et al*. (2023) uso de leguminosas em consórcio reduz a necessidade de fertilizantes nitrogenados, contribuindo para a diminuição das emissões de óxido nitroso, um potente gás de efeito estufa.

O sistema de pastagem em monocultivo, quando bem manejado, também pode apresentar vantagens, como alta produtividade de forragem, facilidade no

manejo e controle de pragas e doenças, além de permitir o uso eficiente de insumos (Euclides *et al*., 2020). Segundo Oliveira *et al*. (2024) pastagens bem manejadas, com adubação equilibrada e controle adequado da lotação animal, podem contribuir para o acúmulo de carbono no solo, especialmente na fração particulada, além de evitar processos de degradação e erosão.

Apesar dos benefícios, a magnitude dos efeitos sobre o carbono do solo pode variar conforme o tipo de solo, clima, tempo de adoção e manejo, havendo ainda lacunas quanto à resposta desses sistemas em diferentes contextos regionais (Oliveira *et al*., 2024; Euclides *et al*., 2020; Smith *et al*., 2020). Estudos recentes destacam a necessidade de pesquisas de longo prazo e avaliações específicas para diferentes biomas e condições edafoclimáticas.

2.3. Influência dos sistemas integrados sobre os estoques de carbono no solo na Mata Atlântica

Na região da Mata Atlântica, os sistemas integrados do tipo árvore-pastagem têm se mostrado altamente eficazes no aumento dos estoques de carbono no solo, configurando-se como uma estratégia promissora para a sustentabilidade do setor agropecuário. De acordo com Oliveira et al,. 2024, a introdução de árvores em pastagens, especialmente espécies como o eucalipto, promove uma maior uniformidade na distribuição do carbono ao longo do perfil do solo, resultado de uma cobertura arbórea mais eficiente e de um sistema radicular mais bem distribuído.

Além do acúmulo de carbono, os sistemas integrados promovem melhorias na estrutura do solo, aumentando a estabilidade dos agregados, o diâmetro médio ponderado e o índice de estabilidade, especialmente quando há aporte contínuo de resíduos orgânicos e raízes profundas (Tanaka *et al*., 2025; Macedo *et al*., 2025). O

acúmulo de carbono ocorre tanto na fração leve (particulada) quanto na fração associada a minerais, sendo a estabilidade dos agregados fundamental para a proteção do carbono contra a decomposição microbiana (Six *et al*., 2022; Macedo *et al*., 2025).

Esses sistemas podem influenciar de maneira diferenciada as frações de carbono do solo. Práticas que aumentem o aporte de resíduos vegetais e promovam a diversidade de espécies favorecendo o acúmulo de carbono particulado (COP), que é mais sensível ao manejo. Representam uma fonte importante de nutrientes para as plantas (Cotrufo et al., 2021). O COP é considerado uma fração lábil, pois responde rapidamente às mudanças no uso e manejo do solo, sendo fundamental para a ciclagem de nutrientes e para a melhoria da fertilidade. Em sistemas integrados, o aumento do COP está relacionado à maior produção de biomassa e à presença de diferentes espécies vegetais, que contribuem para a entrada contínua de matéria orgânica no solo (Oliveira et al., 2024).

Por outro lado, o carbono associado a minerais (CAM) tende a aumentar em sistemas de longo prazo, especialmente quando há manutenção da cobertura do solo e baixa perturbação, garantindo a estabilidade do carbono sequestrado (Six *et al*., 2022; Macedo *et al*., 2025). O CAM é uma fração mais estável e menos suscetível à decomposição, sendo essencial para o sequestro de carbono a longo prazo e para a resiliência dos sistemas agrícolas frente às mudanças climáticas. Em áreas de Mata Atlântica sob sistemas integrados, a combinação de práticas conservacionistas, diversificação de espécies e aporte contínuo de resíduos favorece tanto o acúmulo de COP quanto de CAM, promovendo a sustentabilidade e a estabilidade dos estoques de carbono no solo (Cotrufo *et al*., 2021; Six *et al*., 2022; Macedo *et al*., 2025).

A avaliação conjunta dessas frações permite identificar não apenas o potencial de sequestro de carbono, mas também a qualidade e a estabilidade desse carbono no solo, aspectos fundamentais para a sustentabilidade dos sistemas produtivos em biomas tropicais (Cotrufo *et al*., 2021; Six *et al*., 2022; Macedo *et al*., 2025). Em suma, a literatura evidencia que os sistemas integrados e consorciados de pastagem representam estratégias promissoras para aumentar e estabilizar os estoques de carbono no solo, especialmente em biomas tropicais como a Mata Atlântica. Contudo, ainda existem lacunas quanto à magnitude e à velocidade dessas mudanças em diferentes condições de solo e manejo, justificando a realização de estudos regionais para subsidiar práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes na mitigação das mudanças climáticas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Área e tratamentos

O experimento foi conduzido a campo na cidade Jaboticabal – SP, na Universidade Júlio de Mesquita Filho – Unesp/FCAV, no Setor de forragicultura, pertencente ao Departamento de Zootecnia, localizado a 615m de altitude. Esta área possui clima Aw segundo classificação climática de Köppen e um solo classificado como Latossolo Vermelho Distrófico. O experimento contou com cinco tratamentos, correspondentes a solos coletados em áreas de mata nativa (MN), pastagem em monocultivo de capim marandu (MON), pastagem de *Urochloa brizantha* cv Marandu consorciado com amendoim (CON), sistema silvipastoril (SIL) e integração lavoura pecuária (ILP).

3.2. Descrição das áreas

Mata Nativa (MN): Foi caracterizada por uma área de floresta primária perturbada em que apresentava árvores de médio e grande porte com copas densas e fechadas, também apresentava cipós e espessa camada de liteira no solo. Esta área foi considerada como uso inicial (área de referência) para todos os demais tratamentos.

Pastagem de capim-marandu (MON): Foi caracterizada por uma área exclusiva de capim-marandu, onde recebeu doses de 150 kg de N ha^{-1} ano^{-1} de Ureia. Essa área foi implantada em 2003 e teve a presença de animais, através do método de rotação, onde eles entravam na área quando a a gramínea atingia 30 cm de altura, e saiam da área quando o capim estava com 15 cm de altura.

Consórcio (CON): Área composta por *Urochloa brizantha* cv. Marandu + leguminosa (*Arachis pintoi* BRS Mandobi), essa área foi instalada a 9 anos. Contudo, em 2023 foram alocadas novas mudas de amendoim forrageiro, a fim de aumentar a participação da leguminosa no pasto. Vale ressaltar, que essa área não recebe adubação química devido a presença da leguminosa. Ela também passava por pastejo, seguindo as mesmas alturas de entrada e saída do sistema MON.

Sistema silvipastoril (SIL) composto por capim (*Urochloa brizantha* cv. Marandu) entre fileiras únicas de Eucalyptus espaçadas a 12 m com 1,5 m entre árvores. Esse sistema foi implantado desde 2012, contudo a gramínea utilizada anteriormente era o capim massai *(Megathyrsus maximum x Megathyrsus infestum*) e em 2022/23 o capim-massai foi dessecado e substituído por capim-marandu. Este foi implantado mediante o plantio de soja, seguida de milho com capim-marandu

entre linhas. A soja recebeu adubação de potássio e fósforo, enquanto o milho recebeu adubação de nitrogênio, potássio e fósforo (NPK).

Integração-lavoura-pecuária (ILP): Sistema de Integração lavoura pecuária (ILP) foi implantado em 2021 com plantio de soja (*Glycine max*) para produção de grãos, seguida do plantio de milho implantado com capim-marandu semeado entre linhas. O milho tinha a finalidade de produção de silagem e o capim foi usado para pastejo dos animais (bovinos) até meados de outubro, onde o ciclo é reiniciado, antes do início do ciclo com a soja o capim foi dessecado. Antes da implantação desse sistema essa área foi ocupada com pasto de *Urochloa brizantha* cv*. Xaraés.* Foi feita adubação com nitrogênio, fósforo e potássio no milho e adubação de fósforo e potássio na área de soja. No capim não foi feita adubação química devido aos resíduos deixados no solo pelas outras culturas da adubação com NPK. O ciclo soja, milho e capim se repetiu de 2021 até 2024.

3.3. Amostragem do solo

As amostragens foram realizadas em maio de 2024, em cada sistema foram amostradas 5 repetições (obtidas em trincheiras 0-30 cm de profundidade). Amostras indeformadas para a determinação de densidade do solo e amostras deformadas para determinação dos teores de C foram estratificadas em quatro camadas (0-5, 5-10, 10-20, 20-30 cm). Amostragens de solo na camada 0-20 também foram destinadas para análise químico física do solo (Tabela 1 e 2), sendo feitas no laboratório Athenas em Jaboticabal – SP. As outras análises foram realizadas na cidade Jaboticabal – SP, na Universidade Júlio de Mesquita Filho – Unesp/FCAV, no Setor de forragicultura. A análise de densidade foi feita no Departamento de Solos e Adubos – Unesp/FCAV. Sendo feita pela coleta de solo,

secagem em estufa de 105°C por 24 horas, depois posteriormente pesou-se a amostra seca e quantificou-se o valor da densidade pelo cálculo: Massa seca (g) dividida pelo volume do anel (cm^3).

Figura 1. Trincheiras para coleta de solo



Tabela 1. Características químicas do solo da área experimental feita pela Athenas consultoria e laboratório ltda, situada em Jaboticabal – SP.

Sistemas	pH	M.O	P	S	Ca	Mg	Na	K	Al	H+Al SMP	Soma bases S.B	CTC	Sat. Bases	Sat. Al
	$CaCl_2$	g dm ^{3}	mg dm ^{3}					mmolc dm ^{3}					V%	m%
FLO	6	28,2	11	8,1	54,1	16,1	Ns	7	0	15,7	77,2	92,9	83	0
MON	5,7	32,3	13	11,7	32,2	13,5	Ns	5,8	0,2	22	51,6	73,6	70	0,2
CON	5,7	27,5	34	12,8	38,8	14,3	Ns	6,3	0	19,2	59,3	78,5	73	0
SIL	5	25,7	31	11,4	31,4	13,4	Ns	6,1	0	31,1	50,9	82	63	0
ILP	5,2	26	24	13	36,1	15	Ns	7	0	38	58	96	61	0

pH: Potencial hidrogeniônico determinado com solução de $CaCl_2$; M.O: Matéria orgânica (g/dm³) por Espectrofotometria; P: Fósforo (mg/dm³)em resina por Espectrofotometria; S: Enxofre (mg/dm³) por Turbidimetria; Ca: Cálcio (mmolc/dm³) por Espectrometria de Absorção Atômica; Mg: Magnésio (mmolc/dm³) por Espectrometria de Absorção Atômica; Na: Sódio (mmolc/dm³) por Espectrometria de Absorção Atômica; K: Potássio (mmolc/dm³) por Espectrometria de Absorção Atômica; Al: Alumínio trocável (mmolc/dm³) em KCl por titulometria; H+Al: Acidez potencial (mmolc/dm³) - SMP pH estimado pelo tampão SMP (indicador da necessidade de calagem) por potênciometria; S.B. (Soma de bases): Ca + Mg + K + Na (mmolc/dm³); CTC (Capacidade de Troca Catiônica): Soma de bases + H+Al (mmolc/dm³); Sat. Bases (V%): Saturação por bases = (S.B./CTC) × 100; Sat. Al (m%): Saturação por alumínio = (Al//(SB+Al)) x 100; ns: Não significativo I Referência: IAC 2001. FLO: Floresta; MON: Monocultivo: CON: Consórcio; SIL: Silvipastoril e ILP: Integraçãolavoura-pecuária

Tabela 2. Características físicas do solo da área experimental feita pela Athenas consultoria e laboratório ltda, situada em Jaboticabal – SP.

Sistemas	Argila	Silte	Areia Total	Classificação textural
	%			
Floresta	50	17	34	Argiloso
Monocultivo	41	14	46	Argilo-arenoso
Consórcio	52	18	30	Argiloso
Silvipastoril	40	9	51	Argilo-arenoso
ILP	51	20	29	Argiloso

ILP: Integração lavoura-pecuária. Classificação pelo triangulo textural de Lemos; Santos, 1984.

3.4. Variáveis analisadas

Com as amostras de solo estratificadas por profundidade foram determinados os teores totais de C (COT) no solo por via úmida (colorimetria). Contudo, o C também foi fracionado em C associado a minerais (CAM) e particulado (COP) mediante metodologia de fracionamento proposta por Cambardella; Elliott (1992), em que apenas o COP e o COT foram determinados via úmida (colorimetria) e o CAM foi determinado pela diferença entre o COT menos o COP. Com base nos teores de COT, COP, CAM foram calculados os respectivos estoques mediante ajuste da densidade para massas iguais recomendada por Ellert; Bettany, 1995. Também foi determinado o índice de manejo do C (IMC) considerando o COP como a fração lábil. O IMC foi utilizado para avaliar a rotatividade de carbono orgânico em agroecossistemas. Além disso, foi usado como um indicador da eficácia das estratégias de manejo agrícola para aumentar a produtividade do solo (Vieira et al., 2007, Liu et al., 2017, Jiang et al., 2021).

No método de Cambardella e Elliott (1992) para quantificação do carbono orgânico particulado (COP), uma amostra de solo foi seca e peneirada (≤ 2 mm) inicialmente dispersa em uma solução de hexametafosfato de sódio a 5 g/L, sendo agitada por 16 horas com o objetivo de separar os agregados sem destruir as partículas orgânicas. Em seguida, a suspensão obtida foi submetida ao peneiramento úmido por meio de uma peneira com malha de 53 micrômetros (μm). A fração retida nessa peneira (>53 μm) e classificada como matéria orgânica particulada, que é rica em COP, enquanto a fração que atravessa a peneira contém matéria orgânica mais estável e finamente particulada. A fração retida foi então seca

e analisada para a quantificação do teor de carbono orgânico particulado, neste trabalho por colorimetria (Loss et al., 2009).

Análise de colorimetria segue o seguinte processo, primeiro mediu-se 1g de solo (TFSA) e adicionou-se 10 mL de Na2Cr2O7 (0,667 mol L^{-1}) em ácido sulfúrico (5 mol L-1); agitou-se durante 10 min em agitador com movimento circular-horizontal a 180 rpm; após repouso de uma hora, adicionou-se 50 mL de água, deixando decantar durante 12 h; separou-se o sobrenadante e realizou-se a leitura em espectrofotômetro com filtro de transmissão máxima de 650 nm; acertou-se o zero do aparelho com a prova em branco. Os resultados foram calculados a partir da curva-padrão, preparada pelo método volumétrico (Raij, 2001).

3.5. Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos aos testes de normalidade dos erros (Shapiro-Wilk), homogeneidade de variâncias (Bartlett), testes “F” ($P<0,05$) e de comparação de médias (Tukey) a 5% probabilidade. O programa estatístico usado para fazer as análises foi o R studio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise de densidade

Os resultados de densidade do solo do sistema Silvipastoril foram superiores ao de floresta, monocultivo e ILP na camada 0-5, porém, nas demais camadas o sistema silvipastoril se diferiu apenas do sistema ILP ($p<0,05$), sendo que na última camada avaliada (20-30) não houve nenhuma diferença entre tratamentos ($p>0,05$) (Tabela 3).

Tabela 3. Densidade do solo nas camadas avaliadas

Tratamento	Camadas de coleta (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
Floresta	1,10 ± 0,13 bc	1,20 ± 0,15 ab	1,20 ± 0,13 ab	1,16 ± 0,12
Monocultivo	1,05 ± 0,05 bc	1,15 ± 0,07 ab	1,19 ± 0,02 ab	1,20 ± 0,07
Consórcio	1,17 ± 0,05 ab	1,22 ± 0,03 ab	1,20 ± 0,07 ab	1,11 ± 0,11
Silvipastoril	1,25 ± 0,04 a	1,26 ± 0,04 a	1,30 ± 0,10 a	1,18 ± 0,04
ILP	0,96 ± 0,04 c	1,07 ± 0,02 b	1,06 ± 0,04 b	1,06 ± 0,06
CV	7,06%	6,8%	7,34%	7,79%

ILP: Integração lavoura-pecuária; CV: Coeficiente de variação. Letras minúsculas diferentes representam diferença estatística < 0.05 de probabilidade.

A densidade do solo pode ser afetada pelo efeito de manejo das áreas principalmente nas camadas mais superficiais, como observado na ausência de diferenças na camada 20-30 cm. As justificativas para as diferenças entre os tratamentos nas camadas superiores são decorridas do manejo empregado a anos em cada área.

A principal diferença observada, foi entre o sistema silvipastoril e ilp, em todas as camadas com diferença significativa, possivelmente decorrente do tempo de implantação de cada área. O sistema ILP já estava implantado 4 anos, enquanto o silvipastoril possuía somente um ano de idade. O sistema ILP possui como característica o não-revolvimento do solo, bem como, a utilização de rotação de culturas anualmente (conforme descrita no material e métodos deste trabalho). O plantio de culturas duas vezes ao ano faz com que parte das camadas superiores sejam desestruturadas reduzindo a densidade ao longo dos anos, efeito observado em plantio direto de culturas (Farias et al., 2025). Já o sistema silvipastoril possuía anos de utilização por pastejo, e embora também fosse rotacionado, a presença de gramíneas na área era diferente devido o sombreamento dos eucaliptos (Vieira Junior et al., 2022), que já estavam lá desde 2012, logo, a presença dos animais

em associação com limitada cobertura vegetal podem ter afetado na maior densidade do solo nesse sistema.

A textura também pode explicar a diferença entre silvipastoril e ILP, visto que, ambos passaram por plantio de culturas (próximo ou não à coleta), logo, houve de certa forma desagregação do solo nas linhas de plantio e adubação, o que deveria ter reduzido a densidade do solo no sistema Silvipastoril, possivelmente isso não ocorreu porque esse solo possui maior fração de areia em comparação ao ILP, solos com maior proporção de área tendem a compactar mais facilmente, mesmo após processos de descompactação (Huang & Hartemink, 2020).

Ademais, nenhum dos sistemas apresentou valores superiores aos limítrofes de crescimento vegetal (entre 1,75 e 1,85 Mg m^{-3}), então, embora alguns sistemas tenham apresentado diferença, todos estavam propícios ao crescimento radicular (Reinert et al., 2008).

4.2. Análise de Carbono Orgânico Total (COT)

Os teores de carbono orgânico total (COT) variaram entre os sistemas avaliados e as profundidades analisadas, refletindo o efeito do uso e manejo do solo sobre a dinâmica do carbono (Tabela 4). Todas as camadas foram afetadas, exceto a camada 20-30 cm, mostrando novamente o efeito limitado do manejo empregado nas áreas em afetar o C e profundidade (Azevedo et al., 2024). Os principais efeitos podem ter se limitado na camada 0-5 cm, visto que a camada subsequente não apresentou diferença entre sistemas.

Tabela 4. Carbono orgânico total nas camadas avaliadas em $mg.kg^{-1}$

Tratamento	Camadas de coleta (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
Floresta	32,87 ± 9,0 ab	22,13 ± 10,26	16,10 ± 3,78 ab	12,66 ± 0,58
Monocultivo	46,98 ± 15,7 a	26,05 ± 1,97	19,33 ± 2,99 a	18,50 ± 3,34
Consórcio	31,06 ± 4,4 ab	20,36 ± 1,65	18,36 ± 1,61 ab	18,26 ± 5,35
Silvipastoril	19,13 ± 6,19 b	20,24 ± 6,85	13,48 ± 2,07 b	13,42 ± 5,25
ILP	30,13 ± 5,5 ab	21,44 ± 2,88	17,13 ± 1,50 ab	15,31 ± 2,66
CV	30,7%	26,3%	15,36%	24,74%

ILP: Integração lavoura-pecuária; CV: Coeficiente de variação. Letras minúsculas diferentes representam diferença estatística < 0.05 de probabilidade.

A única diferença observada para o C orgânico total foi entre o sistema de silvipastoril e monocultivo, sendo que os demais foram iguais a estes (Tabela 4). O C orgânico total é uma soma do C particulado e do associado a minerais, sendo um dos parâmetros mais analisados para se determinara sustentabilidade de um sistema (Cotrufo & Lavallee, 2022).

O sistema silvipastoril pode ter apresentado menor teor de COT em relação ao monocultivo pois, ele havia passado por um “desmanche” de manejo muitos anos utilizados na área, logo, isso pode ter acarretado essa redução na concentração de COT, visto que é necessário tempo para acumular esse elemento no solo (Almeida et al., 2021). Outro agravante foi a não formação adequada do capim no primeiro ano de implantação no silvipastoril, o que conferiu espaços não preenchidos por gramínea, e associados a baixa entrada de resíduos iniciais configurou uma fonte de mineralização do C em CO2 (Tavanti et al., 2020).

Outro efeito evidente é a diminuição da concentração de COT ao longo do perfil do solo, sendo esse um efeito rotineiramente observada em trabalhos, já que o C possui limitação de infiltração no solo, sendo esse processo dependente da ação de microrganismos ou práticas de incorporação biológicas ou físicas da M.O no solo (Granja Dorilêo Leite et al., 2025).

4.3. Análise de Carbono Orgânico Particulado (COP)

Para o COP houve diferença entre os sistemas nas camadas 0-5 e 10-20 cm, semelhante ao que aconteceu com a variável COT (tópico anterior). O que já era esperado já que o COP é um dos constituintes do COT. No entanto, diferente do COT, no COP na camada 10-20 cm o sistema consorcio se diferiu do ILP e do sistema silvipastoril (Tabela 5). Os demais tratamentos não se diferiram entre si.

Tabela 5. Carbono orgânico particulado nas camadas avaliadas em $mg.kg^{-1}$

Tratamento	Camadas de solo (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
Floresta	7,81 ± 2,15 ab	3,95 ± 3,30	2,13 ± 0,82 ab	1,74 ± 0,58
Monocultivo	14,96 ± 7,30 a	4,53 ± 0,98	2,70 ± 0,49 ab	2,94 ± 1,54
Consórcio	7,73 ± 2,15 ab	3,91 ± 1,17	3,09 ± 0,70 a	2,98 ± 1,27
Silvipastoril	3,71 ± 1,98 b	2,88 ± 1,67	1,57 ± 0,90 b	2,10 ± 2,21
ILP	7,31 ± 3,14 ab	2,84 ± 1,75	1,65 ± 0,68 b	1,31 ± 0,76
CV	43,39%	53,83%	33,6%	63,2%

ILP: Integração lavoura-pecuária; CV: Coeficiente de variação. Letras minúsculas diferentes representam diferença estatística < 0.05 de probabilidade.

O COP é um C ligado a tamanhos de agregados superiores a 53 micrometros, normalmente, associados a fração areia. É um C de baixa resistência no a ação microbiana, podendo durar até 50 anos após adentrar no solo (Cotrufo & Lavallee, 2022).

Na camada 0-5 cm, o sistema de monocultivo se diferiu apenas do silvipastoril, sendo que nessa comparação, o monocultivo foi superior. Isso pode ter acontecido

devido o sistema monocultivo possuir uma entrada de resíduos vegetais mais elevada que se comparada ao sistema silvipastoril (Baptistella et al., 2020).

Sistemas de monocultivo bem manejados (conforme o presente neste trabalho) apresentam boa produção de matéria seca aérea e abaixo do solo por meio da formação de raízes (Bai et al., 2020), após pastejo parte do material acima do solo e depositado sob o solo, constituindo a liteira da pastagem, esta, pode ser mineralizada, degradada e incorporada ao solo, constituindo inicialmente como uma das maiores fontes de COP na camada superior deste sistema (Tenelli et al., 2025).

Em profundidade o sistema monocultivo contribui com a deposição de raízes, que após a morte radicular, se transformam em biomassa vegetal, que também pode ser mineralizada, degradada e ainda mais incorporada ao solo (Bai et al., 2020), a formação do COP ocorre principalmente a partir da deposição de resíduos e sua degradação ocorre principalmente por alterações bruscas de manejo (Tavanti et al., 2020) conforme observado no sistema silvipastoril, essas mudanças empregadas no silvipastoril podem ter reduzido abruptamente os conteúdos de COP que com o tempo, podem ser recuperadas.

4.4. Análise de Carbono Associado a Mineral (CAM)

Os resultados de CAM mostraram-se semelhantes ao COT e COP, ao apresentar diferença entre tratamento apenas nas camadas 0-5 e 10-20 cm (Tabela 6). Os resultados também demonstram uma diminuição na concentração de C ao longo do perfil do solo.

Tabela 6. Carbono associado à mineral nas camadas avaliadas em $mg.kg^{-1}$

Tratamento	Camadas de solo (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
Floresta	25,06 ± 7,58 ab	18,18 ± 7,28	13,97 ± 3018 ab	10,92 ± 0,80 a
Monocultivo	32,02 ± 8,70 a	21,52 ± 1,05	16,63 ± 2,64 a	15,53 ± 2,06 a
Consórcio	23,34 ± 2,29 ab	16,45 ± 0,72	15,26 ± 1,08 ab	15,28 ± 4,12 a
Silvipastoril	15,42 ± 4,28 b	17,36 ± 5,73	11,91 ± 1,77 b	11,31 ± 3,17 a
ILP	22,82 ± 2,49 ab	18,59 ± 1,60	15,48 ± 1,23 ab	13,99 ± 2,14 a
CV	25,72%	23,05%	14,33%	20,16%

ILP: Integração lavoura-pecuária; CV: Coeficiente de variação. Letras minúsculas diferentes representam diferença estatística < 0.05 de probabilidade.

As únicas diferenças encontradas tanto na camada 0-5 como 10-20 cm, foram entre monocultivo e silvipastoril ($p<0,05$) (Tabela 6). Isso pode ter acontecido porque o sistema monocultivo apresentava um tempo de formação considerável em relação ao tempo de implantação das novas práticas do silvipastoril. Embora o CAM seja mais resistente no solo ele também pode passar por mineralização decorrente de alterações de práticas de manejo (Desjardins et al., 2004).

4.5. Estoques de carbono

Os estoques de carbono na camada 0-30 demonstraram uma maior participação do CAM em relação ao COP (tabela 7). O CAM é mais estável no solo, logo, tende a ficar mais tempo no solo, mesmo sob mudanças de manejo da área, já o COP é o mais afetado e costuma responder mais rápido à mudanças de manejo (Cotrufo & Lavallee, 2022; Tavanti et al., 2020).

Tabela 7. Estoque de carbono nas camadas avaliadas em $mg.kg^{-1}$

Tratamento	Camadas de solo (cm)		
	S-COT 0-30	S-COP 0-30	S-CAM 0-30
Floresta	63,80 ± 14,75 ab	10,94 ± 3,70 ab	52,86 ± 11,86 ab
Monocultivo	83,73 ± 7,49 a	17,02 ± 4,59 a	66,70 ± 3,92 a
Consórcio	76,54 ± 10,85 a	15,82 ± 2,55 ab	60,72 ± 8,31 ab
Silvipastoril	53,04 ± 7,94 b	7,87 ± 2,79 b	45,17 ± 5,34 b
ILP	65,99 ± 6,37 ab	8,94 ± 3,41 b	57,05 ± 4,38 ab
CV	14,49	31,19	30

ILP: Integração lavoura-pecuária-floresta; CV: Coeficiente de variação. Letras minúsculas diferentes representam diferença estatística < 0.05 de probabilidade.

No S-COT maiores resultados foram obtidos nos sistemas monocultivo e consórcio em comparação com o sistema silvipastoril, demais comparações não foram significativas (Tabela 7). O sistema monocultivo de gramínea e de consórcio de gramínea com amendoim são muito semelhantes em manejo, logo isso pode explicar a semelhança entre os estoques de C total dessas áreas. Ambos os sistemas apresentavam um período considerável de formação, visto que numericamente seus valores também eram superiores aos da mata nativa, efeito esse comum em comparações entre áreas com pastagem e mata(Braz et al., 2013).

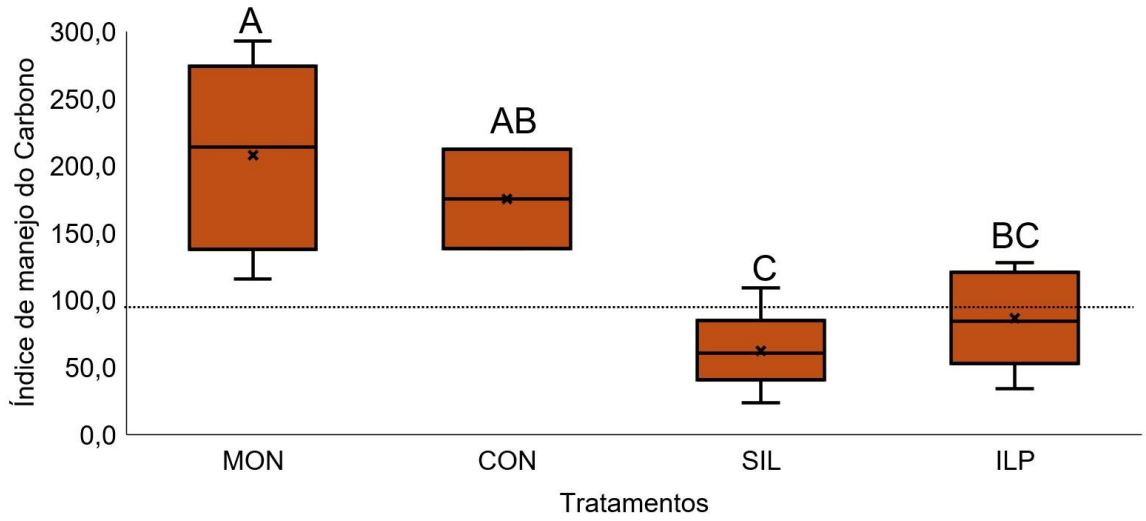
O S-COP foi maior no sistema monocultivo se em comparação com os sistemas silvipastoril e ILP, sendo as demais comparações não significantes. Esse resultado demonstra que a rotação de culturas e o pouco tempo de permanência de gramíneas durante o sistema podem afetar o COP, visto que essa fração é afetada principalmente pela entrada de resíduos vegetais no solo, embora silvipastoril e ILP também forneçam resíduos, aparentemente, o período de transição entre culturas pode mineralizar de forma rápida o resíduo, contribuindo para menores valores de COP (Tavanti et al., 2020), outro ponto importante é o

tempo de formação das duas áreas, sendo esse um efeito direto sobre essa variável (Melo Damian et al., 2023).

O S-CAM diferiu apenas entre monocultivo e silvipastoril, demais comparações não foram significativas. Os maiores valores de S-CAM no monocultivo em comparação ao silvipastoril podem ser decorridos do tempo de implantação dos sistemas, longos anos de idade de um sistema podem ser retratados em longos anos depositando resíduos no solo, e com o tempo, esse resíduo poderia ser aproveitado e convertido em frações mais resistentes e menores, como o CAM (Tenelli et al., 2025), isso aconteceria principalmente pela entrada abaixo do solo, incorporação de raízes (Bai et al., 2020). É de se esperar que com o tempo, o silvipastoril também alcance a estabilidade, assim como aparentemente ocorreu no ILP, mesmo ainda jovem em relação aos demais sistemas.

Os resultados de índice de manejo do carbono (IMC) levaram consideração a quantidade e a labilidade do C nos sistemas, como foi realizado o fracionamento físico, foi considerado o COP como lábil e o COT como o total. O IMC demonstrou que os maiores valores são observados no sistema monocultivo e consórcio em comparação com o sistema silvipastoril (Figura2).

Figura 2. Índice de manejo de carbono



MON: Monocultivo; CON: Consórcio; SIL: Silvipastoril e ILP: Integração lavoura-pecuária-floresta. Letras minúsculas diferentes representam diferença estatística < 0.05 de probabilidade.

É evidente que isso possa ser um efeito do tempo de implantação dos sistemas, pois, podemos observar que o valor médio do sistema ILP (considerado ainda jovem) está próximo do valor médio de referência, isso corrobora com a literatura, que afirma que sistemas de ILP podem contribuir com as melhorias nos estoques de C do solo já nos primeiros anos (Melo Damian et al., 2023; Tavanti et al., 2020), porém, podem levar tempo para chegar a níveis de referência.

5. CONCLUSÃO

O monocultivo foi superior ao sistema silvipastoril na análise de carbono orgânico total, carbono orgânico particulado, carbono orgânico associado a minerais, índice de manejo do carbono e estoque, no entanto, se igualou aos demais sistemas (consórcio, mata nativa e ILP) nessas variáveis. Apesar disso, mostrou os maiores valores numéricos de teores de estoques de carbono, mostrando um bom potencial de estabilização de C ao longo do tempo.

6. REFERÊNCIAS

Almeida, L. L. de S., Frazão, L. A., Lessa, T. A. M., Fernandes, L. A., Veloso, Á. L. de C., Lana, A. M. Q., de Souza, I. A., Pegoraro, R. F., & Ferreira, E. A. (2021). **Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado**. Soil and Tillage Research, 205, 104785. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104785

Alves, L. A. *et al*. **The effect of crop rotation and sheep grazing management on plant production and soil C and N stocks in a long-term integrated croplivestock system in Southern Brazil**. Soil and Tillage Research, v. 203, p. 104678, 2020.

Azevedo, J. C. de, Cardoso, A. da S., Lage Filho, N. M., Faturi, C., Silva, T. C. da, Domingues, F. N., Costa, V. E., Ruggieri, A. C., Reis, R. A., & do Rêgo, A. C. (2024**). Effects of Agricultural Expansion on Soil Carbon and Nitrogen Stocks in the Amazon Deforestation Arc**. Soil Systems, 8(1), 25. https://doi.org/10.3390/soilsystems8010025

Bai X., Guo, Z., Huang, Y., & An, S. (2020). **Root cellulose drives soil fulvic acid carbon sequestration in the grassland restoration process.** CATENA, 191, 104575. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104575

Baptistella, J. L. C., de Andrade, S. A. L., Favarin, J. L., & Mazzafera, P. (2020). **Urochloa in Tropical Agroecosystems. Frontiers in Sustainable Food Systems**, 4. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00119

Börjesson G. et al. Organic carbon stocks in topsoil and subsoil in long-term ley and cereal monoculture rotations. **Biology and Fertility of Soils**, v. 54, n. 4, p. 549–558, 20 abr. 2018.

Braz S. P., Urquiaga, S., Alves, B. J. R., Jantalia, C. P., Guimarães, A. Paula., dos Santos, C. A., dos Santos, S. C., Machado Pinheiro, É. F., & Boddey, R. M. (2013). **Soil Carbon Stocks under Productive and Degraded Brachiaria Pastures in the Brazilian Cerrado**. Soil Science Society of America Journal, 77(3), 914–928. https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0269

Brewer, K. M.; Gaudin, A. C. M. **Potential of crop-livestock integration to enhance carbon sequestration and agroecosystem functioning in semi-arid croplands**. Soil Biology and Biochemistry, v. 149, p. 107936, 2020.

Buller, L. S. *et al*. **Soil improvement and mitigation of greenhouse gas emissions for integrated crop–livestock systems: Case study assessment in the Pantanal savanna highland, Brazil**. Agricultural Systems, v. 137, p. 206–219, 2015.

Cambardella, C. A.; Elliott, E. T. **Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence**. Soil Science Society of America Journal, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992.

Carvalho, M. L. et al. **Stabilization of organic matter in soils: drivers, mechanisms, and analytical tools – a literature review**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 47, 1 jan. 2023.

Casagrande, D. R.; Homem, B. G. C.; Boddey, R. M. **Forage legumes in tropical regions: recent advances and future challenges**. In: International Grassland Congress Proceedings, 2023.

Cotrufo, M. F., & Lavallee, J. M. (2022). **Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform**

its conservation and regeneration (pp. 1–66). https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.11.002

Dalal, R. C.; Thornton, C. M.; Cowie, B. A. **Turnover of organic carbon and nitrogen in soil assessed from δ13C and δ15N changes under pasture and cropping practices and estimates of greenhouse gas emissions**. Science of The Total Environment, v. 465, p. 26-35, 2013.

Desjardins, T., Barros, E., Sarrazin, M., Girardin, C., & Mariotti, A. (2004). **Effects of forest conversion to pasture on soil carbon content and dynamics in Brazilian Amazonia.** Agriculture, Ecosystems & Environment, 103(2), 365–373. https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.008

Ellert, B. H.; Bettany, J. R. **Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes**. Canadian Journal of Soil Science, v. 75, p. 529–538, 1995.

Embrapa. **O sistema silvipastoril**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/florestas/transferencia-de-tecnologia/sistemasilvipastoril>. Acesso em: 16 mar. 2023.

Embrapa. **Integração Lavoura-Pecuária em Solos Arenosos: estudo de caso da Fazenda Campina no Oeste Paulista**. Planaltina, DF, documento 357, 129p. 2020.

Embrapa. **Sistema Integração Lavoura-Pecuária (ILP) para a Região Agreste do Nordeste**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2016. 26p. (Documento 266).

Enck, B. F. et al. Impacto nos atributos do solo sob conversão de floresta para áreas cultivadas na região sul do Amazonas, Brasil. **Geografia Ensino & Pesquisa**, p. e54, 31 dez. 2020.

Euclides, V. P. B. *et al*. **Demandas para pesquisas e desenvolvimento para as pastagens no Brasil**. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2020.

FAO. **The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – Systems at breaking point**. Rome: FAO, 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cb7654en/cb7654en.pdf>. Acesso em: 17 maio 2025.

Farias, P. G. da S., Souza, C. B. da S., Schiavo, J., Rosset, J. S., Ozório, J. M. B., Oliveira, N. de S., Couto, A. M., Tomazi, M., & Salton, J. C. (2025). **Chemical attributes and fractionation of soil organic matter in integrated and conventional agricultural production systems in the Midwest, Brazil.** Journal of South American Earth Sciences, 157, 105444. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105444

Filho, J. F. L. et al. From forest to pastures and silvopastoral systems: Soil carbon and nitrogen stocks changes in northeast Amazônia. **Science of The Total Environment**, v. 908, p. 168251, 15 jan. 2024.

Gil, J.; Berger, M. S. T. **Adoption and development of integrated crop–livestock–forestry systems in Mato Grosso, Brazil**. Agriculture, Ecosystems & Environment, v. 199, p. 394-406, 2015.

Global Change Biology, v. 26, n. 7, p. 3496-3508, 2020.

Granja Dorilêo Leite, F. F., Fontana, A., Nóbrega, G. N., Santos, F. M., Rodrigues Alves, B. J., da Silveira, J. G., Cordeiro, R. C., Cerri, C. E. P., Firmino dos Santos, R. A., & Ribeiro Rodrigues, R. de A. (2025**). Land use change effect on organic**

matter dynamics and soil carbon sequestration in the Brazilian Cerrado: A study case in Mato Grosso do Sul state (Midwest-Brazil). CATENA, 249, 108670. https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108670

Haddix, M. L. et al. Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil. **Geoderma**, v. 363, p. 114160, abr. 2020.

Huang, J., & Hartemink, A. E. (2020). **Soil and environmental issues in sandy soils.** Earth-Science Reviews, 208, 103295. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103295

IPCC. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

Jiang, X., Xu, D. P., Rong, J. J., Ai, X. Y., Ai, S. H., Su, X. Q., et al. (2021). Landslide and aspect effects on artificial soil organic carbon fractions and the carbon pool management index on road-cut slopes in an alpine region. Catena 199:105094. doi: 10.1016/J.CATENA.2020.105094

Kunde, R. J. et al. Frações físicas da matéria orgânica em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1520–1528, set. 2016.

Lal, R. **Soil carbon sequestration to mitigate climate change**. Geoderma, v. 123, p. 1-22, 2004.

Lemos, R.C.; Santos, R.D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2.ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Embrapa-SNLCS, 1984. 46p

Liu, X. et al. Multiphase boundary of C 16+ heavy n-alkanes and CO 2 systems. **Petroleum Exploration and Development**, v. 44, n. 1, p. 105–110, fev. 2017.

Loss, A. et al. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica. **Ciência Rural**, v. 39, n. 4, p. 1067–1072, 20 mar. 2009.

Macedo, R. S. et al. **Aggregate-Associated Organic Carbon Storage and Iron Oxides Respond to Land Use in Atlantic Forest Patches in Northeastern Brazil**. Eurasian Soil Science, v. 58, n. 2, 1 fev. 2025.

Medeiros, A. S.; Santos, T. C.; Maia, S. M. F. **Effect of long-term and soil depth on soil organic carbon stocks after conversion from native vegetation to conventional tillage systems in Brazil**. Soil and Tillage Research, v. 219, p. 105336, 2022.

Melo damian, J., da Silva Matos, E., Carneiro e Pedreira, B., César de Faccio Carvalho, P., Monica Premazzi, L., & Eduardo Pellegrino Cerri, C. (2023). **Intensification and diversification of pasturelands in Brazil: Patterns and driving factors in the soil carbon stocks**. CATENA, 220, 106750. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106750

Minasny, B. *et al*. **Soil carbon 4 per mille**. Geoderma, v. 292, p. 59-86, 2017.

Oliveira, D. M. S. *et al*. **Crop, livestock, and forestry integration to reconcile soil health, food production, and climate change mitigation in the Brazilian Cerrado: A review**. Geoderma Regional, v. 37, e00796, 2024.

ONU. The 17 Goals. 2022. **Sustainable Development**. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 10 jun. 2022.

Oxides Respond to Land Use in Atlantic Forest Patches in Northeastern Brazil. Eurasian Soil Science, v. 58, p. 17, 2025.

Paustian, K.; Larson, E.; Kent, J.; Marx, E.; Swan, A. et al. **Soil C Sequestration as a Biological Negative Emission Strategy. Frontiers in Climate**, v. 1, p. 8, 2019.

Raij, B.van; Andrade, J.C.; Cantarella, H. & Quaggio, J.A. Determinação da Matéria Orgânica. In: RAIJ, B.van; Andrade, J.C.; Cantarella, H. & Quaggio, J.A., eds. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2001. p.189-199.

Reinert, D. J., Albuquerque, J. A., Reichert, J. M., Aita, C., & Andrada, M. M. C. (2008). **Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho**. Revista Brasileira de Ciência Do Solo, 32(5), 1805–1816. https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002

Six, J.; Frey, S. D.; Thiet, R. K.; Batten, K. M. **Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage**. Soil and Tillage Research, v. 221, 105377, 2022.

Smith, P.; Adams, J.; Beerling, D. J.; Beringer, T.; Calvin, K. V.; Fuss, S.; Griscom, B.; Hagemann, N.; Kammann, C.; Kraxner, F.; Minx, J. C.; Popp, A.; Renforth, P.; Vicente, J. L. V.; Keesstra, S. **Land management options for greenhouse gas removal and their impacts on ecosystem services and the Sustainable Development Goals**. Global Change Biology, v. 26, n. 7, p. 3496-3508, 2020.

Vieira Junior, N. A., Evers, J., dos Santos Vianna, M., Pedreira, B. C. e, Pezzopane, J. R. M., & Marin, F. R. (2022). **Understanding the arrangement of Eucalyptus-**

Marandu palisade grass silvopastoral systems in Brazil. Agricultural Systems, 196, 103316. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103316

Vieira, F. C. B. et al. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. **Soil and Tillage Research**, v. 96, n. 1-2, p. 195–204, out. 2007.

Tanaka, R. T.; Weber, O. L. Dos S.; Torres, G. N.; Miranda, J. G. DE; Couto, E. G. **Soil aggregation and organic carbon under different management systems in the cerrado of Mato Grosso**. Revista Caatinga, v. 38, e12508, 2025.

Tavanti, R. F. R., Montanari, R., Panosso, A. R., La Scala, N., Chiquitelli Neto, M., Freddi, O. da S., Paz González, A., de Carvalho, M. A. C., Soares, M. B., Tavanti, T. R., & Galindo, F. S. (2020). **What is the impact of pasture reform on organic carbon compartments and CO2 emissions in the Brazilian Cerrado?** CATENA, 194, 104702. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104702

Tenelli, S., Nascimento, A. F., Gabetto, F. P., Pimentel, M. L., Strauss, M., Bordonal, R. O., Cerri, C. E. P., Cherubin, M. R., & Carvalho, J. L. N. (2025**). Well-managed grass is a key strategy for carbon storage and stabilization in anthropized Amazon soils**. Journal of Environmental Management, 373, 123742. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123742