

UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AGRÍCOLA E AMBIENTAL

DISSERTAÇÃO

ESTOQUES DE CARBONO, NITROGÊNIO E DAS
FRAÇÕES GRANULOMETRICAS DA MATÉRIA
ORGÂNICA DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS
DE MANEJO AGRÍCOLA SUSTENTÁVEIS E EM
VEGETAÇÃO NATIVA NO CERRADO

NÉLIA DALÚVIA RAFAEL CAMBANHANE

2025



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO – UFRRJ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL**

**ESTOQUES DE CARBONO, NITROGÊNIO E DAS FRAÇÕES
GRANULOMETRICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO SOB
DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO AGRÍCOLA SUSTENTÁVEIS E EM
VEGETAÇÃO NATIVA NO CERRADO**

NÉLIA DALÚVIA RAFAEL CAMBANHANE

Sob a Orientação da Professora
Dra. Érika Flávia Machado Pinheiro

e Coorientação do
Dr. David Vilas Boas De Campos

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, Área de Concentração em Sistemas agrícolas.

SEROPÉDICA, RJ

FEVEREIRO DE 2025

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C174e Cambanhane, Nélia Dalúvia Rafael , 1999-
 Estoques de Carbono, Nitrogênio e das frações
 granulométricas da matéria orgânica do Solo Sob
 diferentes sistemas de manejo agrícola sustentáveis e
 em Vegetação Nativa no Cerrado / Nélia Dalúvia Rafael
 Cambanhane. - Seropédica, 2025.
 97 f.

 Orientadora: Érika Flávia Pinheiro Machado.
 Coorientador: David Vilas Boas De Campos.
 Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal
 Rural do Rio de Janeiro, Engenharia Agrícola e
 Ambiental, 2025.

 1. Estoque de Carbono, Nitrogênio, COP e COAM. 2.
 Manejo sustentável do solo . 3. Protocolo MRV. 4.
 Cerrado. 5. Meta-análise . I. Machado, Érika Flávia
 Pinheiro, 1975-, orient. II. Campos, David Vilas Boas
 De , 1972-, coorient. III Universidade Federal Rural
 do Rio de Janeiro. Engenharia Agrícola e Ambiental.
 IV. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL

NÉLIA DALÚVIA RAFAEL CAMBANHANE

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, área de Concentração em Sistemas agrícolas.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28 / 02 /2025.

Érika Flávia Machado Pinheiro. Ph.D. UFRRJ
(Orientadora)

Ana Carolina Souza Ferreira. Ph.D. UFRRJ

Aldair de Sousa Medeiros. Ph.D. UFPI



ATA Nº 85º ATA DE DEFESA DE NÉLIA DALÚVIA RAFAEL CAMBANHA/2025 - PPGEAAMB
(12.28.01.00.00.00.40)
(Nº do Documento: 655)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 17/03/2025 13:03)

ERIKA FLAVIA MACHADO PINHEIRO

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

DATS (11.39.00.35)

Matricula: ###408#9

(Assinado digitalmente em 18/03/2025 10:16)

ANA CAROLINA DE SOUZA FERREIRA

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.607-##

(Assinado digitalmente em 18/03/2025 09:40)

NÉLIA DALÚVIA RAFAEL CAMBANHANE

DISCENTE

Matricula: 2023#####0

(Assinado digitalmente em 17/03/2025 14:33)

ALDAIR DE SOUZA MEDEIROS

ASSINANTE EXTERNO

CPF: ###.###.574-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrj.br/documentos/> informando seu número: **655**, ano: **2025**, tipo:
ATA, data de emissão: **17/03/2025** e o código de verificação: **d00b47c87a**

DEDICATÓRIA

Aos meus Pais, Marta Maria e Rafael Camba
E as minhas irmãs, Sónia Rafael e Milcan Rafael
Dedico!

AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho não teria sido possível sem a contribuição generosa de diversas pessoas a quem estou profundamente agradecida.

Primeiramente, a Deus, pelo dom da vida, por ter me iluminado e orientado durante essa caminhada.

Aos meus pais Rafael Camba e Marta Maria, pelo apoio incondicional e pelas orações. As minhas Irmãs Sônia da Estrela Rafael e Mílcan da Fátima Rafael pela confiança, e por serem a minha fonte de inspiração, em especial a mana Soninha, por ser minha amiga, companheira, por estar comigo e me apoiar nos momentos difíceis, por ser 100% presente em tudo apesar da distância.

A Vânia Quitéria dos Santos e Ulícia Matavele pela amizade, companheirismo, por todo amor, suporte e pela confiança.

Ao tio Jaime e mano Edson pela ajuda, conselhos e carinho.

A mana Meriamo, mana Célia, mano João e pastor Micas por todas as orações, carinho e consideração.

A tia Sandra, tia Márcia, tio Claudío, tia Iêda, tio José Jorge (*in memoriam*), por abrirem as portas da vossa casa, e permitirem que eu fizesse parte da família.

Ao docente Lateiro de Sousa, por todo apoio e motivação para a realização do mestrado.

A UFRRJ em si, ao PPGAAMB, e a CAPES pela oportunidade, financiamento que me proporcionaram para realização do mestrado, em especial aos professores que ajudaram a trilhar esse caminho.

A professora Érika Pinheiro, minha orientadora, pelos ensinamentos e elevado conhecimento científico que me transmitiu e pelo seu constante apoio, incentivo, disponibilidade que sempre mostrou.

Ao Davi (coorientador), Aldair Medeiros e Fernando por toda ajuda e paciência ao esclarecer as dúvidas.

A todos que fazem parte de GRUMOS, pelo apoio, ensinamentos, paciência e todo amor transmitido, profunda gratidão. Aos meus colegas do mestrado, por todo apoio prestado durante os anos de formação.

Ao meu namorado Bilton Nhantumbo, por sempre cuidar de mim, por ser um companheiro leal nessa jornada, pelo amor incondicional, pelos conselhos, motivações e compreensão.

Aos alojamentos da Pós-graduação, em especial ao Feminino, pelo acolhimento, momentos compartilhados, desde os surtos as risadas.

Aos meus amigos: Camila, Ludmilla, Nataly, Hemilly, Jaqueline, Maiara, Mayara Tavares, Isabel Amílcar, Reina, Eliene, Shelsea, Ana Clara, Michel, Ana Beatriz, Jacob, Sara, Luany, Mateus, Francisco, Franz, Mayara, Fabiana, Inácio, Walton, Edmilson Banze, Wilsine, Ian, Jaídson, Isaac, e uma gratidão especial para as meninas do quarto 11.

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

Esta pesquisa é desenvolvida no âmbito do Projeto Rural Sustentável - Cerrado, financiado pela Cooperação Técnica aprovada pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), com recursos do Financiamento Internacional do Clima do Governo do Reino Unido, tendo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) como beneficiário institucional. O Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) é o responsável pela execução e administração do projeto. A Embrapa é a responsável pela coordenação científica e a Associação Rede ILPF pelo apoio técnico.

BIOGRAFIA

Nélia Dalúvia Rafael Cambanhane, nasceu na cidade de Maxixe, Inhambane, em 04 de Junho de 1999, filha de Marta Maria José e Rafael Cambanhane Camba. Concluiu o ensino médio na Escola Secundária 1º de Maio de Chicunque, em 2016. Iniciou a graduação em Engenharia Hidráulica Agrícola e Água Rural em Março de 2017 no Instituto Superior Politécnico de Gaza e concluiu em abril de 2022. Durante a graduação foi voluntária em projetos de extensão rural, em abril de 2018, e participou na monitoria da turma do primeiro ano do curso de Engenharia Hidráulica na disciplina de prática de sistemas hidráulicos (PSH). Em agosto a dezembro de 2019 estagiou na farma ENVEST Ltda na área de irrigação e drenagem, e estagiou em Maio a setembro de 2021 no Laboratório Provincial de água e alimentos de Gaza. Iniciou assistência universitária nas disciplinas de Máquinas hidráulicas e Drenagem agrícola em Fevereiro de 2022 a dezembro de 2022. Em novembro de 2022, foi aprovada para o mestrado no curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, sob a orientação da Profª. Drª. Érika Flávia Machado Pinheiro.

RESUMO GERAL

CAMBANHANE, Nélia Dalúvia Rafael. **Estoques de Carbono, Nitrogênio e das frações granulométricas da matéria orgânica do Solo Sob diferentes sistemas de manejo agrícola sustentáveis e em Vegetação Nativa no Cerrado**. 2025. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2025.

A conversão da vegetação nativa do Cerrado em sistemas agrícolas tem alterado a dinâmica do carbono e do nitrogênio no solo. A compreensão desses impactos é crucial para o desenvolvimento de estratégias que mitiguem as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e favoreçam a fixação de carbono estável no solo, por meio da adoção de práticas de manejo agrícola sustentáveis. O objetivo do presente estudo foi avaliar os estoques de C e N no solo e das frações granulométricas da matéria orgânica do solo, sob diferentes sistemas de manejo agrícola sustentáveis e em áreas de vegetação nativa do Cerrado. O estudo foi dividido em dois capítulos. No primeiro capítulo foram avaliados os estoques de carbono e nitrogênio do solo, assim como, as frações granulométricas da matéria orgânica em diferentes sistemas de produção agrícola sustentáveis e em área sob vegetação nativa de Cerrado, em João Pinheiro (MG). Foram selecionados três sistemas de manejo de solo: Pasto produtivo (PP), Integração Lavoura-pecuária (ILP), Sistema Agroflorestal (SAF). Também foi avaliada uma área sob Mata Nativa de Cerrado (MN), como referência. Foram abertas 3 trincheiras para cada tratamento e coletadas amostras de terra deformadas e indeformadas até 100 cm de profundidade, nas seguintes camadas: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80, 80-100 cm para avaliação dos estoques de C, N. O fracionamento físico da matéria orgânica foi analisado até a profundidade de 30 cm e foram extraídas as seguintes frações: COP (Carbono Orgânico Particulado) e COAM (Carbono Orgânico Associado aos Minerais). Como resultados, os estoques de C e N no solo variam, significativamente, de acordo com o uso da terra e o manejo adotado nas camadas avaliadas. A substituição de MN para ILP não altera os estoques de C em todas as camadas analisadas. Para o estoque de COAM, a MN apresentou valores elevados em todas as profundidades avaliadas e o sistema ILP em relação aos demais manejos, apresentou maior aporte de estoque de COAM na camada superficial com $9,35 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Conclui-se que os sistemas de manejo sustentável ILP, contribuem para a manutenção e estabilidade dos estoques de C e N e das frações granulométricas da matéria orgânica no bioma do Cerrado.

O segundo capítulo teve como objetivo realizar uma meta-análise com dados de estudos recentes, publicados entre 2018 e 2024, para quantificar o efeito dos diferentes sistemas de manejo nos estoques de C e N e das frações granulométrica da matéria orgânica no Cerrado. Os resultados indicaram que sistemas convencionais reduziram os estoques de C, N, COP e COAM enquanto práticas conservacionistas, como plantio direto e integração lavoura-pecuária, favoreceram a retenção de carbono no solo. Os resultados indicam que a conversão da Mata Nativa do Cerrado para sistemas agrícolas sustentáveis, como a integração lavoura-pecuária, proporciona maior estoque de C e N, bem como das frações granulométricas de matéria orgânica, indicando maior estabilidade do carbono e menor degradação do solo.

Palavras-chaves: Mudança do uso da terra, integração lavoura-pecuária, sistema agroflorestal, pasto produtivo, meta-análise.

GENERAL ABSTRACT

CAMBANHANE, Nélia Dalúvia Rafael. **Carbon and Nitrogen Stocks and Granulometric Fractions of Soil Organic Matter Under Different Sustainable Agricultural Management Systems and Native Vegetation in the Cerrado**. 2025. 97 p. Dissertation (Master's in Agricultural and Environmental Engineering). Institute of Technology, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, 2025.

The conversion of native Cerrado vegetation to agricultural systems has altered the dynamics of soil carbon and nitrogen. Understanding these impacts is crucial for developing strategies to mitigate greenhouse gas (GHG) emissions and promote the sequestration of stable carbon in the soil through the adoption of sustainable agricultural management practices. The objective of this study was to evaluate soil C and N stocks and the granulometric fractions of soil organic matter under different sustainable agricultural management systems and in areas of native Cerrado vegetation. The study was divided into two chapters. In the first chapter, soil carbon and nitrogen stocks, as well as the granulometric fractions of organic matter, were evaluated in different sustainable agricultural production systems and in an area of native Cerrado vegetation in João Pinheiro (MG). Three soil management systems were selected: Productive Pasture (PP), Crop-Livestock Integration (CLI), and Agroforestry System (AFS). An area of native Cerrado vegetation (NV) was also evaluated as a reference. Three trenches were opened for each treatment, and deformed and undisturbed soil samples were collected up to 100 cm depth in the following layers: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80, and 80-100 cm for C and N stock assessment. The physical fractionation of organic matter was analyzed up to 30 cm depth, and the following fractions were extracted: POC (Particulate Organic Carbon) and MAOC (Mineral-Associated Organic Carbon). The results showed that soil C and N stocks vary significantly according to land use and management practices in the evaluated layers. The replacement of NV with CLI did not alter C stocks in all analyzed layers. For MAOC stock, NV showed high values at all evaluated depths, and the CLI system, compared to other management practices, contributed the highest MAOC stock in the surface layer with $9.35 \text{ Mg C ha}^{-1}$. It was concluded that sustainable management systems such as CLI contribute to the maintenance and stability of C and N stocks and the granulometric fractions of organic matter in the Cerrado biome. The second chapter aimed to conduct a meta-analysis using data from recent studies published between 2018 and 2024 to quantify the effect of different management systems on C and N stocks and the granulometric fractions of organic matter in the Cerrado. The results indicated that conventional systems reduced C, N, POC, and MAOC stocks, while conservationist practices, such as no-till farming and crop-livestock integration, favored soil carbon retention. The findings suggest that the conversion of native Cerrado vegetation to sustainable agricultural systems, such as crop-livestock integration, provides higher C and N stocks, as well as higher granulometric fractions of organic matter, indicating greater carbon stability and reduced soil degradation.

Keywords: Land-use change, crop-livestock integration, agroforestry system, productive pasture, meta-analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização dos pontos de coleta na fazenda estudada para os três sistemas de manejo agrícola e a mata nativa, no município de João Pinheiro (MG). MN: Mata Nativa (verde); ILP: Integração Lavoura-Pecuária (azul); SAF: Sistema Agroflorestal (laranja); PP: Pasto Produtivo (vermelho).	28
Figura 2. Uso de solo da Fazenda Espelho sob A- Mata Nativa (MN), B- Pasto produtivo (PP), C- Integração Lavoura Pecuária (ILP) e D- Sistema Agroflorestal (SAF).	30
Figura 3. Valores de densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) sob os diferentes sistemas de manejo agrícola sustentável e mata nativa, em João Pinheiro (MG).	36
Figura 4. Resultado dos teores de carbono (A) e nitrogênio no solo (B), sob os diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).	39

Figura 1. Localização da área de estudo o Cerrado Brasileiro.	58
Figura 2. Fluxograma realizado para a execução da meta-análise	60
Figure 3. Resposta da influência da textura do solo, uso do solo, período, profundidade e tipo de solo no estoque de carbono	67
Figure 4. Resposta da influência da textura do solo, uso do solo, período, profundidade e tipo de solo no estoque de nitrogênio	69
Figura 5. Resposta da influência da textura do solo, uso do solo, período, profundidade e tipo de solo no estoque de Carbono Organico Particulado	Erro! Indicador não definido.
Figura 6. Resposta da influência da textura do solo, uso do solo, período, profundidade e tipo de solo no estoque de Carbono Orgânico Associados aos Minerais	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 4. Análise granulométrica do solo sob diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).	34
Tabela 5. Resultados da análise química do solo sob diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).	37
Tabela 6. Valores da relação C/N do solo sob os diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).	40
Tabela 7. Valores de estoques de carbono no solo ($Mg\ ha^{-1}$) sob os diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).	42
Tabela 8. Valores de estoques de nitrogênio no solo ($Mg\ ha^{-1}$) sob os diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).	43
Tabela 9. Teores de COP no solo ($Mg\ ha^{-1}$) sob os diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).	44
Tabela 10. Teores de COAM no solo ($Mg\ ha^{-1}$) sob os diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).	45
Tabela 11. Estoque de COP no solo ($Mg\ ha^{-1}$) sob os diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).	46
Tabela 12. Estoque de COAM no solo ($Mg\ ha^{-1}$) sob os diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).	46

LISTA DE SIMBOLOS

C - Carbono

CO₂ - Dióxido de Carbono

COAM - Carbono Orgânico Associado aos Minerais

COP - Carbono Orgânico Particulado

DS - Densidade do Solo

FAO- Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura

GEE - Gases de Efeito Estufa

ILP - Integração Lavoura-pecuária

IPCC- Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

MN - Mata Nativa

MOS - Matéria Orgânica do Solo

N - Nitrogênio

PP - Pasto Produtivo

SAF -Sistema Agroflorestal

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Caraterização do Cerrado Brasileiro	3
2.2 Sistemas de Manejo Conservacionistas para o Cerrado	4
2.3 Estoques de Carbono e Nitrogênio nos Solos do Cerrado.....	5
2.4 Fracionamento Físico da Matéria Orgânica do Solo	7
2.5 Políticas Nacionais e Internacionais de Monitoramento e Retenção de Carbono no Solo..	8
2.5.1 Políticas Internacionais	9
2.5.2 Políticas nacionais	11
c. Créditos de Carbono (Lei nº 15.042/2024)	12
2.6 Meta-análise	13
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
CAPÍTULO I: ESTOQUES DE CARBONO, NITROGÊNIO E DAS FRAÇÕES DO CARBONO NO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO AGRÍCOLA SUSTENTÁVEIS NO CERRADO	24
1. INTRODUÇÃO	25
2. MATERIAL E MÉTODOS	28
2.1 Localização da área de estudo	28
2.2 Histórico da área experimental e tratamentos avaliados	28
2.3 Delineamento Experimental.....	30
2.4 Coleta das amostras de solo deformadas e indeformadas	30
2.5 Preparo das amostras de terra e análises físicas e químicas do solo	31
2.6 Determinação do Carbono Orgânico Particulado e do Carbono Orgânico Associado aos Minerais	31
2.7 Determinação dos Teores e Estoques de Carbono e Nitrogênio Total e das Frações COP e COAM	32
2.8 Análise Estatística.....	32
3. RESULTADO E DISCUSSÃO	34
3.1 Densidade do Solo	35
3.2 Análise Química do Solo	36
3.3 Teores de C e N no solo.....	38
3.4 Relação carbono/nitrogênio do Solo.....	39
3.5 Estoques de C e N no solo	41
3.6 Fracionamento Físico da Matéria Orgânica do Solo.....	43
3.6.1 Teores de Carbono Orgânico Particulado.....	43
3.6.2 Carbono Orgânico Associado aos Minerais	44
3.7 Estoque de COP e COAM	45

3.7.1	Estoque de Carbono orgânico particulado.....	45
3.7.2	Estoque de Carbono orgânico associado aos minerais.....	46
4.	CONCLUSÃO	48
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
CAPÍTULO I: META-ANÁLISE: UMA REVISÃO MÉTRICA SOBRE A INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE MANEJO AGRÍCOLA E COBERTURA VEGETAL NOS ESTOQUE DE CARBONO, NITROGÊNIO E DAS FRAÇÕES ORGÂNICAS DO CARBONO EM SOLOS DO CERRADO		54
1.	INTRODUÇÃO	56
2.	MATERIAL E MÉTODOS	58
2.1	Localização da Área de Estudo.....	58
2.2	Compilação de dados	58
2.3	Organização dos dados obtidos	59
2.4	Meta-análise.....	60
3.2	Influência da textura do solo, uso do solo, período, profundidade e tipo de solo no estoque de Nitrogênio.....	67
3.3	Influência da textura do solo, uso do solo, período, profundidade e tipo de solo no estoque de Carbono Orgânico Particulado.	69
3.5	Influência da textura do solo, uso do solo, período, profundidade e tipo de solo no estoque de Carbono Orgânico Associado aos Minerais.	Erro! Indicador não definido.
5.	CONCLUSÃO GERAL	74
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
7.	ANEXOS.....	78

1. INTRODUÇÃO GERAL

O aumento global das emissões de gases do efeito estufa (GEE) para a atmosfera, desde o início da era industrial, por influências antrópicas tem provocado mudanças no clima, consequentes do aquecimento global (Ghosh et al., 2023). A influência humana no clima de acordo com exposto no Sexto Relatório de Avaliação do IPCC, (IPCC, 2021), tem sido a principal causa do aquecimento observado, com aumento da temperatura superficial global de 1,59 °C.

No Brasil, as emissões do GEE atingiram 2,3 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente (CO₂eq) em 2023, marcando uma redução de 12% em comparação com o ano anterior (Coelho et al., 2024). Esse declínio foi impulsionado principalmente pela queda de 37% no desmatamento no bioma de Amazônia, no entanto, o Cerrado registrou um aumento expressivo na perda de vegetação. Segundo dados do projeto MapBiomas, em 2023, as taxas de desmatamento no Cerrado foram elevadas, com um crescimento de 68%, resultando em mais de 1,1 milhão de hectares desmatados (Coelho et al., 2024).

As mudanças no uso da terra causadas por atividades antrópicas exercem impacto significativo na dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS), alterando os estoques de carbono e nitrogênio ao converter áreas nativas em sistemas agropecuários. Neste sentido, o tipo de manejo do solo adotado influencia diretamente esse equilíbrio, podendo resultar em aumento ou diminuição dos níveis de carbono e nitrogênio em comparação ao sistema natural. Essas alterações afetam, consequentemente, a qualidade da MOS (Khorramdel et al., 2013; Costa et al., 2020).

No Cerrado brasileiro, as pastagens no ano 2023 atingiram cerca de 51 milhões de hectares, onde 31% dessa área representa as pastagens do Brasil (Vieira, 2024), dos quais 67% estão degradados de forma intermediária ou severa. Desse modo, necessita da implementação de práticas de melhorias ou restauração completa dessas áreas, que irá reduzir as emissões dos gases efeito estufa (GEE) e melhorar a produtividade de biomassa devido a conservação do solo, e consequentemente, vai evitar o desmatamento de novas áreas sob vegetação nativa de Cerrado (Leite et al., 2025).

Mediante essa crescente problemática, práticas de manejo sustentável que minimizem o revolvimento do solo e aporte maior quantidade de resíduos vegetais na camada superficial do solo, surgem como alternativas em potencial para reduzir os impactos negativos decorrentes das diferentes formas de uso do solo. Segundo Silva et al. (2023), a manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo contribui para a melhoria

de suas propriedades físicas e da atividade biológica, devido ao aporte de matéria orgânica. Além disso, essa prática favorece o aumento do estoque de carbono no solo, auxiliando na mitigação das mudanças climáticas ao diminuir a liberação de dióxido de carbono para atmosfera (Ziviani et al., 2024).

Ademais, Lavallo et al. (2020), destaca que além de estocar o carbono (C) no solo, sua estabilidade é essencial como um fator determinante para manejo do solo. Desta forma, o fracionamento físico da MOS, representada pelas frações de C orgânico particulada (COP) e C orgânico associada aos minerais (COAM) podem ser um indicador do efeito da mudança de uso da terra e contribuir para uma melhor compreensão da dinâmica da MOS (Gmach et al., 2018; Barbosa et al., 2024).

Diante do exposto, objetivou-se avaliar os estoques de C e N do solo e das frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo agrícola sustentáveis e em áreas de vegetação nativa do Cerrado. O trabalho encontra-se estruturado em dois capítulos, sendo o primeiro intitulado: **“Estoques de Carbono e Nitrogênio e Estabilização do Carbono no Solo sob diferentes sistemas de manejo agrícola sustentáveis e em Vegetação Nativa no Cerrado”** e o segundo capítulo é intitulado como: **“Meta-análise: uma revisão métrica sobre a influência dos sistemas de manejo agrícola e cobertura vegetal nos estoques de carbono, nitrogênio e das frações granulométricas da matéria orgânica em solos do Cerrado”**.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Caracterização do Cerrado Brasileiro

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro, que ocorre principalmente no planalto central brasileiro, ocupando, aproximadamente, 24% da área do território nacional, distribuídos por mais de dois milhões de quilômetros quadrados (IBGE, 2024). Este bioma abrange os estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso do Sul e Distrito Federal, incluindo a parte sul de Mato Grosso, o oeste da Bahia, oeste e norte de Minas Gerais, sul do Maranhão, grande parte do Piauí e prolonga-se em forma de corredor até Rondônia e, de forma disjunta em algumas áreas do Nordeste brasileiro e parte de São Paulo (Nascimento, 2020; Mourão, 2021).

O clima do Cerrado é sazonal, apresentando alternância entre um inverno frio e seco que ocorre de abril a setembro, e verão quente e chuvoso entre os meses de outubro a março. Durante o inverno, a umidade relativa do ar apresenta níveis críticos, podendo atingir valores próximos a 15%, principalmente nos meses de julho e agosto. A precipitação média anual é em torno de 1.500 mm e as temperaturas médias são, geralmente, amenas ao longo do ano, variando entre 22 e 27°C (Oliveira et al., 2022).

A vegetação desse bioma é caracterizada por apresentar três tipos de fitofisionomias: florestais (Mata Ciliar, Mata de Galeria, Mata Seca e Cerradão); savânicas (Cerrado sentido restrito, Parque de Cerrado, Palmeiral e Vereda) e campestres (Cerrado sentido restrito, Parque de Cerrado, Palmeiral e Vereda), que apresentam vários subtipos (Giácomo et al., 2015). Não obstante a sua ampla biodiversidade, o Cerrado é também um dos biomas mais ameaçados do mundo com 132 espécies da flora ameaçadas de extinção (Ribeiro; Walter, 1998; Forzza et al., 2012).

Os solos predominantes no Cerrado são caracterizados por serem antigos, profundos, bem drenados, com baixa fertilidade natural e acidez acentuada (Balbino et al., 2011; Costa et al., 2020). Os principais usos do solo nesse bioma estão relacionados à agropecuária, especialmente às pastagens e ao cultivo de lavouras anuais e perenes. As atividades mais importantes são a criação de gado em pastagens cultivadas e o plantio de lavouras como soja, milho, algodão e café. Essas práticas são as principais responsáveis pela conversão das coberturas vegetais naturais no Cerrado (Sano et al., 2019; Sousa et al., 2020). O uso de práticas agrícolas convencionais, aliada à baixa produção de biomassa, leva à redução da matéria orgânica e, conseqüentemente, do carbono e do

nitrogênio no solo. Ademais, a aração e a gradagem do solo aceleram a oxidação da matéria orgânica e degradam a estrutura do solo (Sousa et al., 2020).

2.2 Sistemas de Manejo Conservacionistas para o Cerrado

A mudança no uso da terra é um dos principais fatores de emissão de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil, sendo esse processo especialmente, mais intenso no bioma Cerrado (Vieira, 2024). Após a conversão da vegetação nativa para atividades agropecuárias, os sistemas de manejo convencionais, que incluem práticas como o uso do fogo e de maquinários pesados, baseado no revolvimento do solo, inicia o processo de degradação física, química e biológica, resultando em perda da qualidade do solo tornam-se as principais fontes de emissão de GEE (Alves et al., 2017). Esse processo geralmente contribui para a redução dos estoques de C e N do solo com o passar do tempo, pois as áreas sob uso intensivo apresentam valores de C e N, relativamente, menor ao observado em condições originais de mata nativa (Gmach et al., 2018).

Mediante a este cenário, os sistemas de manejo conservacionistas surgem como estratégia importante para a redução do desmatamento, das emissões de GEE e da erosão do solo. Além disso, esses sistemas promovem aportes significativos de resíduos orgânicos na camada superficial do solo, promovendo a manutenção da matéria orgânica do solo (MOS), dos estoques de C e N e a melhoria na fertilidade do solo (Oliveira et al., 2022).

Neste sentido, os sistemas conservacionistas de manejo proporcionam uma nova realidade para o uso dos solos na região do Cerrado. A transição de sistemas de manejo convencional para sistemas conservacionistas, tais como: plantio convencional para plantio direto, pastagens degradadas para pastagens produtivas ou sistemas de manejo integrados como: integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), integração lavoura-pecuária (ILP) e sistemas agroflorestais (SAF), trazem melhorias na qualidade do solo.

Ademais, o sistema de plantio direto (SPD) foi introduzido no Cerrado brasileiro no início da década de 1980, inicialmente por produtores oriundos do Paraná, região Sul do Brasil. Esses produtores trouxeram consigo a tecnologia do plantio direto, inicialmente implementada no Paraná em 1972, pelo pioneiro Herbert Bartz (Fernandes et al., 2019). A prática consiste em manter a cobertura vegetal sobre o solo, reduzindo a evaporação da água, melhorando a infiltração de água e protegendo o solo contra a erosão. A adoção do SPD no Cerrado foi impulsionada por programas e associações, como a Associação de

Plantio Direto no Cerrado (APDC), fundada com o objetivo de promover e aprimorar essa técnica na região (Silva et al., 2022).

Os sistemas de pastagem produtivas também podem contribuir para a melhoria da qualidade do solo, por meio da adição dos resíduos vegetais depositados na superfície do solo e, das raízes do pasto que podem atingir até 100 cm de profundidade quando bem manejadas, adicionando C nas camadas inferiores do solo (Zeferino et al., 2023). Com isso, pode contribuir no aumento dos teores de carbono no solo e melhorar as condições de aeração e capacidade de infiltração de água, por apresentarem um sistema radicular extenso e renovado constantemente (Freitas et. al., 2020).

De acordo com Almeida et al. (2021), as pastagens de gramíneas perenes possuem sistemas radiculares abundantes e de elevada rizodeposição com um uniforme distribuição de exsudatos radiculares no solo, que favorecem a manutenção da estrutura do solo e, conseqüentemente, do C no solo. Uma das teorias aceitas para reter e/ou aumentar C no solo é a oclusão dos resíduos orgânicos dentro de agregados do solo (Cotufro; Lavallee, 2022).

Os sistemas agroflorestais (SAFs) são compostos por espécies florestais e não florestais cultivadas simultaneamente com culturas anuais ou perenes, seguindo princípios agroecológicos (Rocha et al., 2014). Esses sistemas, do ponto de vista ambiental, surgem como instrumentos capazes de contribuir para a mitigação de GEE e melhoria da qualidade dos solos já desgastados pela ação antrópica ao longo dos anos (Almeida et al., 2021).

2.3 Estoques de Carbono e Nitrogênio nos Solos do Cerrado

O solo pode ser considerado o mais importante reservatório de carbono terrestre, pois atua retendo C no solo e mitigando as emissões de GEE (Sousa et al. 2020). Dentre os reservatórios de C, estima-se que aproximadamente 1.500 Pg de C são estocados nos solos do planeta na camada 0-100 cm. Essa quantidade equivale a 4,5 vezes ao total de C presente na biomassa vegetal e a 3,3 vezes a quantidade de C na atmosfera (Roscoe et al., 2006).

A incorporação de carbono no sistema ocorre, principalmente, por meio da fotossíntese realizada pelas plantas, desempenhando papel fundamental em sistemas de manejo altamente produtivos que adicionam elevados níveis de resíduos vegetais ao solo. Quando as práticas agrícolas são combinadas com o manejo adequado do solo, é possível promover o aumento dos estoques de MOS (Sisti et al., 2004).

O manejo eficiente estimula a produção de biomassa vegetal, que, ao se decompor, contribui para a formação de MOS. Adicionalmente, práticas como a rotação e consórcio de culturas, assim como adubação verde ajudam a preservar e incrementar a quantidade de carbono armazenado no solo, favorecendo sua estabilização. Além disso, o sistema de manejo adequado pode melhorar a estrutura do solo, facilitando a retenção de nutrientes e água, além de proporcionar condições favoráveis para o acúmulo de material orgânico em agregados do solo e, conseqüentemente a manutenção ou incremento dos níveis de matéria orgânica (Roscoe et al., 2006).

Os estoques de C do solo variam de acordo com fatores globais e locais, tais como: clima, vegetação, material de origem, topografia, tempo e o uso e manejo da terra. Esses fatores influenciam direta ou indiretamente na ciclagem de nutrientes e na dinâmica da MOS (Loss et al., 2011; Assad et al., 2013; Oliveira, 2015).

O uso de práticas de manejo sustentáveis, baseadas na cobertura contínua do solo, rotações de culturas, manejo integrado de nutrientes e sem perturbação do solo, podem contribuir para proteção ou aumento dos estoques de C e N nos solos. Os sistemas de manejo do solo permitem, aumentar a produtividade e melhorar o aproveitamento das áreas cultivadas, evitando a expansão da agricultura e pecuária em áreas de vegetação nativa (Vasconcelos et al., 2019).

Os estudos realizados por Locatelli et al. (2022) avaliando as mudanças causadas pelos diferentes usos da terra nos estoques de C em áreas do Cerrado, na profundidade de 0-100 cm, observaram que a área de ILP apresentou maiores estoques de C (120,55 Mg ha⁻¹) em relação à área sob pastagem e vegetação nativa (98,3 Mg ha⁻¹).

Avaliando o estoque de C no solo em diferentes sistemas de manejo na camada de 0-100 cm, Duarte et al. (2023) observaram que o valores dos estoques de C foram estatisticamente iguais nas áreas de pastagem e ILP, com valores de 83,89 e 84,30 Mg ha⁻¹, respectivamente.

O estudo realizado por Xavier et al. (2023), no estado da Bahia, avaliando três sistemas de manejo em diferentes tipos de solo, na camada de 0-100 cm. No Neossolo Quartzarênico, os estoques de C na pastagem foram de 40,60 Mg ha⁻¹, na vegetação nativa de 60,01 Mg ha⁻¹ enquanto que no Latossolo Amarelo atingiram para pastagem 54,21 Mg ha⁻¹ e mata nativa de 62 Mg ha⁻¹. Isso evidencia que a classe de solo exerce influência na capacidade de armazenamento de carbono.

Com relação ao N, destaca-se o estudo de Figuerêdo et al. (2018), avaliando dois sistemas de manejo sob plantio direto, um com de soja (PD1) e outro com milho (PD2) e

o plantio convencional na camada de 0-100 cm. O PD1 apresentou estoque de C de 31 Mg ha⁻¹ superando o plantio convencional que apresentou valores estatisticamente iguais ao PD2 e mata nativa.

2.4 Fracionamento Físico da Matéria Orgânica do Solo

A compreensão da dinâmica da MOS em sistemas agrícolas permite o desenvolvimento de estratégias de manejo que promovam a manutenção e/ou aumento da MOS, melhorando, dessa forma, a qualidade do solo (Zeferino et al., 2023). A MOS compreende compartimentos com diversas composições químicas, onde as formas mais estáveis estão, geralmente, associadas à fração mineral do solo formando os complexos organo-minerais (Rocci et al., 2021; Song et al., 2021).

A distribuição das frações da MOS reflete processos de acúmulo e decomposição do carbono, possibilitando a melhor compreensão das interações entre o uso e a cobertura do solo. Para a manutenção dos estoques de carbono e nitrogênio, é essencial que a MOS esteja presente em formas estáveis, menos suscetíveis à decomposição. Caso contrário, a quantidade de MOS pode diminuir quando composta por materiais de rápida decomposição e menor complexidade química, que são mais sensíveis às mudanças no uso do solo (Gmach et al., 2018; de Almeida et al., 2021).

As práticas de uso e manejo do solo promovem alterações nos compartimentos da matéria orgânica do solo que podem ser avaliadas através do fracionamento físico da MOS (Gmach et al., 2018; Karhu et al., 2019).

O fracionamento físico da MOS é dividido em densimétrico e granulométrico. Alguns métodos utilizam somente o densimétrico, outros somente o granulométrico (Cambardella; Elliott, 1992) e por fim, algumas metodologias utilizam os dois (Sohi et al., 2001). Como o Protocolo de monitoramento, relato e verificação (MRV) recomenda que se utilize o método granulométrico para monitorar carbono no solo, proposto por Cambardella e Elliott (1992), esse método será destacado nessa revisão.

O fracionamento granulométrico é uma técnica que permite a separação da MOS com base no tamanho das partículas, possibilitando a identificação de diferentes frações que a compõem. Esse método classifica a MOS em complexos organo-mineral com as frações areia, silte e argila. Um dos métodos mais utilizados para essa finalidade foi desenvolvido por Cambardella e Elliott (1992). Nesse procedimento, o solo é disperso com uma solução de hexametáfosfato de sódio e, posteriormente, passa por uma peneira de abertura de diâmetro de 53 µm (0,053 mm). A matéria orgânica retida na peneira é

classificada como carbono orgânico particulado (COP), enquanto a fração que atravessa a peneira é considerada carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e carbono orgânico dissolvido. A fração COP é composta por partículas maiores ($2\text{mm}-0,053\text{ mm}$), com resíduos vegetais em decomposição, sendo uma fração lábil e sensível às práticas de manejo. Por outro lado, o COAM é formada por partículas menores ($< 0,053\text{ mm}$), fortemente ligadas aos minerais do solo, apresentando maior estabilidade e resistência à decomposição (Karhu et al., 2019).

A escolha do método de fracionamento granulométrico é justificada pela sua eficiência em diferenciar frações da MOS com dinâmicas e funções distintas no solo, fornecendo informações relevantes sobre a qualidade e a sustentabilidade dos sistemas de manejo empregados (Lugato et al., 2021).

Locatelli et al. (2022) em seu estudo sobre avaliação das mudanças causadas pelos diferentes usos da terra nos estoques de COP e COAM em áreas do Cerrado, na camada de 0-100 cm, observaram que a área de ILP apresentou maiores estoques de COP e COAM ($18,20$ e $101,37\text{ Mg ha}^{-1}$) em relação à área sob pastagem, porém obteve valores menores de COAM em relação ao encontrado na mata nativa ($117,04\text{ Mg ha}^{-1}$).

Avaliando os estoques de COP e COAM na camada de 0-50cm sob diferentes sistemas de manejo conservacionistas e mata nativa, nos solos do Cerrado, Barbosa et al. (2022) observaram que o estoque de COP foi maior no plantio direto ($2,03\text{ Mg ha}^{-1}$) e ILP com 8 anos de implementação ($2,02\text{ Mg ha}^{-1}$), seguido da mata nativa ($1,79\text{ Mg ha}^{-1}$) em relação ao ILP de 2 e 4 anos de implementação. Em contrapartida, valores maiores de COAM nos foram observados no ILP com 8, 4 e 2 anos de implementação, com valores de $11,53\text{ Mg ha}^{-1}$, $126,72\text{ Mg ha}^{-1}$ e $114,4\text{ Mg ha}^{-1}$ respectivamente em relação ao plantio direto e mata nativa.

2.5 Políticas Nacionais e Internacionais de Monitoramento e Retenção de Carbono no Solo

Nos últimos anos tem se enfrentado desafios relacionados com as alterações climáticas, a perda de áreas agricultáveis devido a degradação dos solos e a desertificação, o crescimento populacional, o aumento da insegurança alimentar global, e a perda de biodiversidade. Em meio a esses desafios, os solos tornaram-se um dos principais recursos para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas, uma vez que constituem o principal reservatório de carbono nos ecossistemas terrestres (IPCC, 2019).

De forma a implementar estratégias para a redução de emissões de GEE na agropecuária, foram criadas políticas internacionais e nacionais que incentivam práticas sustentáveis de manejo do solo, uso eficiente de insumos e adoção de sistemas produtivos de baixa emissão de carbono.

2.5.1 Políticas Internacionais

a. Iniciativa “4 por 1000” (COP21, 2015)

O programa "4 por 1000" que representa aumento de 0,4% ao ano no estoque de carbono no solo, apresentado durante a Conferência do Clima COP21, foi uma proposta desenvolvida no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) em dezembro de 2015, integrando o Plano de Ação Lima-Paris. Teve como finalidade propor medidas para reduzir os impactos das mudanças climáticas, promover a adaptação do setor agrícola a esses desafios e fortalecer a segurança alimentar global. A iniciativa tem como meta promover solos saudáveis e com maior capacidade de armazenamento de carbono, visando combater o aquecimento global e erradicar a fome. Para isso, incentiva a captura natural de carbono orgânico nos solos e apoia pesquisas científicas de ponta nessa área em escala internacional (UNFCCC, 2023).

O programa está alinhado com três dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): "Fome Zero" (ODS2), "Ação Contra a Mudança Global do Clima" (ODS13) e "Vida Terrestre" (ODS15). O foco principal são os solos agrícolas, que muitas vezes apresentam alto grau de degradação, mas têm grande potencial para recuperação, o que pode resultar em ganhos significativos de fertilidade e produtividade. Diversas técnicas agrícolas já estão disponíveis para aumentar os níveis de carbono orgânico no solo, promovendo uma agricultura mais sustentável, eficiente e ecologicamente responsável, o que permite sua aplicação em larga escala. Além disso, a iniciativa busca engajar diversos atores, como agricultores, pesquisadores, empresas, organizações não governamentais, governos locais e nacionais, instituições financeiras e entidades internacionais, para (UNFCCC, 2023):

a) adotar e implementar práticas baseadas em evidências científicas que mantenham e recuperem a saúde dos solos, transformando-os em reservatórios de carbono, com base em métodos comprovados e abordagens racionais;

b) promover uma agricultura mais resiliente e produtiva, aliada ao manejo sustentável da terra, gerando empregos e renda, contribuindo para o desenvolvimento econômico e social; e

c) apoiar a criação de uma rede global de monitoramento para avaliar os estoques de carbono no solo, além de fomentar políticas públicas que incentivem produtores rurais e florestais a adotar práticas que preservem e aumentem o carbono armazenado no solo.

b. Protocolo MRV

Em 2017, o simpósio Global sobre o carbono orgânico, organizado pela FAO, pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), pelo Painel Técnico Intergovernamental sobre Solos da FAO, entre outras organizações proporcionou uma oportunidade de rever a importância dos solos no contexto da adaptação e mitigação das mudanças climáticas, do desenvolvimento sustentável e da neutralidade da degradação dos solos (FAO, 2020).

O documento final gerado nesse simpósio focou em recomendações para desenvolver um protocolo que permita medir, reportar, verificar e monitorar o estoque de carbono no solo e as emissões dos GEE em áreas agrícolas. O protocolo de Medição, Relato e Verificação (MRV) constitui uma etapa importante para projeto que visam monitorar o carbono na agricultura. Além de estocar o C, o protocolo leva em consideração a fertilidade do solo, o armazenamento de água no solo, o aumento da produção de alimentos e resiliência à seca (FAO, 2017).

O objetivo do protocolo MRV é fornecer uma estrutura padrão de conceitos e metodologias para o monitoramento, relato e verificação das mudanças nos estoques de carbono e emissões/remoções de GEE em sistemas agrícolas que adotam práticas de manejo sustentável do solo ao nível da fazenda. A sua aplicação destina-se a diferentes terras agrícolas, incluindo culturas anuais e perenes (culturas alimentares, fibrosas, forrageiras e bioenergéticas), arroz em casca, pastagens com gado, pastagens produtivas, matagais, silvipastoril e agrossilvicultura (FAO, 2020).

O protocolo MRV estabelece que, para monitorar o C no solo deve-se fazer amostragem de terra deformada para analisar os teores de C no solo e carbono orgânico particulado. Também deve-se realizar amostragem indeformada de terra para a determinação da densidade do solo. A recomendação é que sejam quantificados os estoques de C no pelo menos até 30 cm de profundidade do solo, sendo opcional, porém recomendável quando possível, avaliar nos primeiros 100 cm de profundidade.

2.5.2 Políticas nacionais

a. Plano ABC e ABC+

O monitoramento do estoque de carbono nos solos do Brasil tem sido um desafio. Existe o estímulo a adoção de projetos que promovam a adoção de práticas agrícolas de baixa emissão de carbono. Nesse sentido, com o intuito de reduzir as emissões de GEE, o governo brasileiro lançou, no ano de 2010, o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC) visando à consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura (MAPA, 2011; Brasil, 2012).

Esse Plano tinha como objetivo garantir o aperfeiçoamento contínuo e sustentável das práticas de manejo que permitissem a redução da emissão dos GEE e enfrentamento dos efeitos adversos da mudança climática. Sua estruturação contemplou o fomento a um conjunto de sistemas, tecnologias, produtos e processos, chamados de “Tecnologias ABC”, com sólido lastro técnico-científico, quais sejam: 1) Sistema Plantio Direto (SPD); 2) Recuperação de Pastagens Degradadas (RPD); 3) Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF); 4) Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN); 5) Florestas Plantadas (FP)e; 6) Tratamento de Dejetos Animais (TDA). Durante os dez anos de execução do Plano ABC, contabilizou-se a adoção das tecnologias ABC em um total de 54,03 milhões de ha em todo território nacional, totalizando redução de 193,67 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq).

Com o término do Plano ABC, em 2020, surge o plano ABC+ (2020-2030), que visa continuar a promover a adoção de práticas e sistemas sustentáveis considerados no Plano ABC, porém agora sistematizadas, que demonstrem eficácia nas mudanças do clima, seguindo também como base as recomendações do protocolo MRV (Brasil 2021). Ampliou-se o escopo da Recuperação de Pastagens Degradadas (RPD), que passa a considerar, além da recuperação, a renovação de pastagens com algum grau de degradação e passa a ser Práticas para Recuperação de Pastagens Degradadas (PRPD), e do Tratamento de Dejetos Animais (TDA), que passa a ser nominado Manejo de Resíduos da Produção Animal (MRPA), considerando outros substratos, além dos dejetos animais. Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN), agora Bioinsumos (BI), passa a incluir também Microrganismos Promotores do Crescimento de Plantas (MPCP) e multifuncionais. ILPF é renomeado Sistemas de Integração (SIN), no qual se dá maior destaque aos Sistemas Agroflorestais, tratando-o separadamente da ILPF. Por fim, incluem-se três novos sistemas, práticas, produtos e processos de produção sustentáveis, denominados

SPSABC: Sistema Plantio Direto Hortalças (SPDH), dentro de Sistema Plantio Direto, Sistemas Irrigados (SI) e Terminação Intensiva (TI). As metas estabelecidas no Plano ABC+ visam reduzir a emissão de carbono equivalente (CO₂ eq) em até 1,1 bilhão de toneladas no setor agropecuário até 2030 (Brasil, 2021).

b. Pagamento por Serviços Ambientais-PSA

O PSA é uma política pública que visa incentivar a conservação e o uso sustentável dos recursos naturais, oferecendo remuneração ou benefícios aos proprietários de terras ou produtores rurais que adotem práticas de manejo ambientalmente responsáveis. No contexto do monitoramento de carbono, o PSA está diretamente relacionado à preservação e recuperação de áreas que funcionam como sumidouros de carbono, como florestas, matas ciliares e áreas de vegetação nativa. O programa funciona com base no princípio de que as pessoas que contribuem para a preservação ambiental, como a manutenção da vegetação nativa, o reflorestamento e o manejo sustentável do solo, devem ser compensadas pelos serviços ambientais que prestam, como o sequestro de carbono e a proteção da biodiversidade (Brasil, 2021).

Esse pagamento pode ser feito de várias formas: em dinheiro, créditos de carbono, benefícios fiscais ou outras formas de incentivos. O valor do pagamento pode variar dependendo da área preservada, da qualidade ambiental do local e dos serviços ecossistêmicos prestados, como a regulação hídrica e a mitigação das mudanças climáticas. O PSA no Brasil tem sido utilizado em vários estados, como no Programa de Pagamento por Serviços Ambientais do Estado do Amazonas, que busca remunerar os proprietários de terras que preservam as florestas no estado, e em projetos privados como o PSA do Estado de São Paulo, que visa a conservação de nascentes de água e áreas de vegetação nativa. Além disso, o Programa Bolsa Verde, do governo federal, também pode ser considerado uma forma de PSA, focado na geração de renda para famílias em áreas rurais que preservam o meio ambiente e adotam práticas sustentáveis (Brasil, 2021).

c. Créditos de Carbono (Lei nº 15.042/2024)

A Lei nº 15.042/2024 cria o Mercado Brasileiro de Créditos de Carbono, estabelecendo um sistema regulamentado para a compra e venda de créditos de carbono no Brasil. Essa legislação tem como objetivo permitir que o país atenda suas metas climáticas, ao mesmo tempo em que oferece uma maneira de monetizar a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Um crédito de carbono representa a redução de uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂) ou seu equivalente em outros gases de efeito estufa, como o metano (CH₄). Quando uma empresa ou país reduz suas emissões ou implementa projetos que sequestram carbono, como reflorestamento, recuperação de áreas degradadas ou produção de energia limpa, ela pode gerar créditos de carbono. Esses créditos podem ser comprados por empresas ou governos que não conseguem atingir suas próprias metas de redução de emissões.

A Lei nº 15.042/2024 estabelece as regras para o funcionamento do mercado de créditos de carbono no Brasil, incluindo a criação de uma plataforma para a emissão, comercialização e monitoramento desses créditos. A legislação define quem pode emitir os créditos, como os projetos devem ser certificados e como as transações devem ser registradas para garantir a transparência. Além disso, estabelece a criação de uma regulamentação nacional que busque a integridade ambiental dos projetos e assegure que os créditos de carbono realmente representem reduções de emissões.

Com a criação do mercado de créditos de carbono, o Brasil busca incentivar projetos de redução de emissões e promover a sustentabilidade, ao mesmo tempo que contribui para as metas do Acordo de Paris. O mercado brasileiro pode funcionar tanto para compensação interna das emissões, quanto para a venda desses créditos no mercado internacional.

2.6 Meta-análise

A meta-análise é uma técnica estatística que combina os resultados de vários estudos sobre um mesmo tema. É um método que permite sintetizar e quantificar os dados, melhorando a precisão da pesquisa bibliográfica (Sousa et al., 2008). Embora existam meta-análises publicadas nos anos de 1904 e 1952, o termo meta-análise foi utilizado pela primeira vez por Glass, em 1976, para indicar a análise estatística dos resultados de muitos estudos individuais, com o propósito de obter um padrão.

Os métodos de estatística multivariada e análise de agrupamentos, aliados com monitoramento de carbono no solo, permitem a visualização da proximidade entre os valores de estoque de C obtidas em diferentes regiões, tipos de solos, clima e vegetação porém no mesmo bioma, de modo a estabelecer-se um padrão da variação desses valores (Liu et al., 2022).

Silva et al. (2023), em seu estudo sobre uma revisão sistemática com meta-análise, para entender as relações entre os manejos ILPF, ILP, e sistema convencional de produção

de pastagem, e os atributos, matéria orgânica do solo, estoque de carbono no período de 2013-2023, observaram que o estoque de carbono no solo o sistema o sistema de ILP (17,09 kg ha⁻¹) apresentou maior média de efeito do modelo, quando comparada ao sistema convencional de produção de pastagem (15,94 kg ha⁻¹).

Estudo realizado por Medeiros et al. (2025), avaliaram os impactos de diferentes usos da terra nos estoques de COS (carbono orgânico do solo) no Brasil, onde observaram que no Brasil, as mudanças no uso da terra e nos sistemas de manejo alteram os estoques de carbono orgânico do solo (COS), principalmente no bioma Caatinga, com uma redução média de 9,48%. Além disso, constataram que o tipo de uso da terra e as práticas de manejo afetam o COS nos solos brasileiros, com uma tendência de redução de 10,97% na conversão de vegetação nativa para sistemas de cultivo convencional com aração, e aumento de 7,55% na conversão de cultivo convencional com aração para plantio direto.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, L.L. de S., Frazão, L.A., Lessa, T.A.M., Fernandes, L.A., Veloso, A. L. de C., Lana, A.M.Q., de Souza, I.A., Pegoraro, R.F., Ferreira, E.A. Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. **Soil Tillage Res.** 205, 104785. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104785>.
- Alves, B. J. R.; Madari, B. E.; Boddey, R. M. Integrated crop–livestock–forestry systems: prospects for a sustainable agricultural intensification. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, p.1-4, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9851-0>
- Assad, E. D.; Pinto, H.S.; Martins, S.C.; Groppo, J.D.; Salgado, P.R.; Evangelista, B.; Vasconcellos, E.; Sano, E.E.; Pavão, E.; Luna, R.; Camargo, P.B.De.; Marlinelli, L.A. Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey. **Biogeosciences**, v. 10, n. 10, p. 6141-6160, 2013. <https://doi.org/10.5194/bg-10-6141-2013>
- Balbino L. C.; Kichel, A. N.; Bungenstab, D. J.; Almeida, R. G. De. Sistemas de integração: conceitos, considerações, contribuições e desafios. In: BUNGENSTAB, D. J. (Org). **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 835 p. <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1113066>
- Barbosa, L.R.; Souza, H.A.; Teixeira, N.M.L.; Leite, L.F.C. Organic matter compartments in an Ultisol under integrated agricultural and livestock production systems in the Cerrado. **Ciência Rural**, v. 52, p. 20200845, 23 mar. 2022. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200845>
- Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030): visão estratégica para um novo ciclo / Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação. 2021 <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/abcenglish.pdf>
- Brasil. (2021). **Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021**. Dispõe sobre a política nacional de pagamento por serviços ambientais. Diário Oficial da União.

<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2021/lei-14119-13-janeiro-2021-790989-normaatualizada-pl.pdf>

Brasil. (2024). **Lei nº 15.042, de 2024**. Estabelece normas para o mercado brasileiro de créditos de carbono. Diário Oficial da União.

<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-15042-11-dezembro-2024-796690-publicacaooriginal-173745-pl.html>

Cambardella, C.A., Elliott, E.T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 56, 777–783.

<https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>

Cerri, C.E.P., Paustian, K., Bernoux, M., Victoria, R.L., Melillo, J.M., Cerri, C.C. Modeling changes in soil organic matter in Amazon forest to pasture conversion with the Century model. **Glob. Chang. Biol.** 10, 815–832. 2004

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00759.x>.

Coelho, Cíntia de Albuquerque Wanderley. **Mudança do clima no Brasil: síntese atualizada e perspectivas para decisões estratégicas**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2024. 106 p. ISBN 978-65-5471-018-3.

https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/arquivos/Relatorio_Mudanca_Clima_Brasil.pdf

Costa, A. A.; Luduvico, G.A.; Macedo, I.L.M. Atributos físicos e estoque de carbono em áreas sob diferentes formas de uso do solo no Cerrado do Oeste da Bahia / Physical attributes and carbon stock in areas under different forms of use in Cerrado soil of west of Bahia. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 32294–32306, 29 maio 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n5-612>

Cotrufo, M. F.; Lavalley, J. M. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. Em: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Elsevier, 2022. v. 172p. 1–66.

Duarte, C. S.; Oliveira, J. C.; Freitas, I. C.; Silva, K. T.; Matrangolo, W. J. R.; Lana, A. M. Q.; Frazão, L. A. Estoques de carbono e nitrogênio do solo em um sistema integrado de produção com *Cratylia argentea* no Cerrado brasileiro. 2023.

<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1158286>

- Fernandes, C. H. D. S.; Tejo, D. P.; Arrunda, K. M. A. Desenvolvimento do Sistema de Plantio Direto no Brasil: Histórico, Implantação e Culturas Utilizadas. **UNICIÊNCIAS**, v. 23, n. 2, p. 83–88, 4 dez. 2019. <https://doi.org/10.17921/1415-5141.2019v23n2p83-88>
- Figueiredo, C. C.de.; Oliveira, A.D.de.; Santos, I.L.dos.; Ferreira, E.A.B.; Malaquias, J.V.; Sá, M.A.C.de.; Carvalho, A.M.de.; Junior, J.de.D.G.dos. Relationships between soil organic matter pools and nitrous oxide emissions of agroecosystems in the Brazilian Cerrado. **Science of The Total Environment**, v. 618, p. 1572–1582, mar. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.333>
- Figuerêdo, K. S. et al.; Pereira, M. T.J.; Silva, I.R.; Oliveira, T.S. Long-term changes in organic matter stocks and quality in an Oxisol under intensive vegetable cultivation. **CATENA**, v. 188, p. 104442, 1 maio 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104442>
- Filho, J. F. L.; de Oliveira, H.M.M.R.; de Sousa, V.M.; dos Santos, A.C.; de Oliveira, T.S. 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, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168251>
- Forzza, Rafaela Campostrini et al. New brazilian floristic list highlights conservation challenges. **BioScience Journal**, v. 62, n. Ja 2012, p. 39-45, 2012.Disponível em: <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.1.8>.
- Fujii, K., Sukartiningih, Hayakawa, C., Inagaki, Y., Kosaki, T. Effects of land use change on turnover and storage of soil organic matter in a tropical forest. **Plant Soil** 446, 425–439.2020. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04367-5>.
- Freitas, I.C., Ribeiro, J.M., Araújo, N.C.A., Santos, M.V., Sampaio, R.A., Fernandes, L.A., Azevedo, A.M., Feigl, B.J., Cerri, C.E.P., Frazão, L.A. Agrosilvopastoral Systems and Well-Managed Pastures Increase Soil Carbon Stocks in the Brazilian Cerrado. **Rangel Ecol Manag** 73, 776-785. 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy12122926>
- Gazolla, P. R.; Guareschi, R. F.; Perin, A.; Pereira, M. G.; Rossi, C. Q. Fractions of soil organic matter under pasture, no-tillage system and crop-livestock integration.

Semina: Agricultural Sciences, v.36, n.2, p.693-704, 2015.
<https://doi.org/10.5433/1679-0359>.

Giácomo, R. G.; Pereira, M.G.; Guaraschi, R.F.; Machado, D.L. Atributos químicos e físicos do solo, estoques de carbono e nitrogênio e frações húmicas em diferentes formações vegetais. **Ciência Florestal**, v. 25, p. 617–631, set. 2015.
<https://doi.org/10.5902/1980509819613>

Guareschi, R. F.; Pereira, M. G.; Perin, A. Estoque de carbono em latossolo vermelho distroférico sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**, v.7, n. 4, p. 597-602, 2012.
<https://doi.org/10.5039/agraria.v7i4a1767>

Gmach, M.R., Dias, B.O., Silva, C.A., No´brega, J.C.A., Lustosa-Filho, J.F., SiqueiraNeto. Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado. Brazil. **Geoderma Reg.** 14, e00178. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00178>

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. Biomas brasileiro. 2024 s. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/territorio/18307-biomas-brasileiros.html>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2019. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems (eds Shukla, P. R. et al.).
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2019. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems (eds Shukla, P. R. et al.).
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>

Karhu, K., Hiltunen, E., Järvenpää, M., Arppe, L., Christensen, B.T., Fritze, H., Kulmala, L., Oinonen, M., Pitkanen, J.-M., Vanhala, P., Heinonsalo, J., Liski, J., 2019. Similar temperature sensitivity of soil mineral-associated organic carbon

regardless of age. **Soil Biol. Biochem.** 136, 107527
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107527>.

Khan, Nahid, Jhariya, K., Raj, Abhishek, Banerjee, Arnab, Meena, Ram Swaroop, Khan, N, Jhariya, · M K, Raj, A, Banerjee, A, Meena, R S, 2021. Soil Carbon Stock and Sequestration: Implications for Climate Change Adaptation and Mitigation. **Ecol. Intensif. Nat. Resour. Sustain. Agric.** 461–489. https://doi.org/10.1007/978-981-334203-3_13.

Khorramdel, S.; Koocheki, A.; Mahallati, M.N.; Khorasani, R.; Ghorbani, R. Evaluation of carbon sequestration potential in corn fields with different **management systems**. **Soil & Tillage Research**, v.133, p.25-31, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.04.008>

Lavallee, J.M.; Soong, J.L.; Cotrufo, M.F., 2020. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Glob. Chang. Biol.* 26, 261–273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>.

Leite, F. F. G. D.; Fontana, A.; Nóbrega, G. N.; Santos, F.M.; Rodrigues, B. J.; Silveira, J. G. da.; Cordeiro, R. C.; Cerri, C. E. P.; Santos, R. A. F. dos.; Rodrigues, R. de. A. R. 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**, v. 249, p. 108670. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108670>

Liu, X.; Sheng, H.; Wang, Z.; Ma, Z.; Haung, X.; Li, L. Does Grazing Exclusion Improve Soil Carbon and Nitrogen Stocks in Alpine Grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau? A Meta-Analysis. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 977, jan. 2020. <https://doi.org/10.3390/su12030977>

Locatelli, J. L.; Santos, J. L.; Cherubin, M. R.; Cerri, C. E, P. Changes in soil organic matter fractions induced by cropland and pasture expansion in Brazil's new agricultural frontier. **Geoderma Regional**, v. 28, p. e00474, mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00474>

Loss, A.; Pereira, M.G.; Anjos, L.H.C.; Giacomo, S.G.; Perin, A. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavourapecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 269-1276, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000022>

- Lugato, E., Lavallee, J.M., Haddix, M.L., Panagos, P., Cotrufo, M.F. Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter. **Nat. Geosci.** 14, 295–300.2021 <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00744-x>.
- Medeiros, A. D. S.; Cesário, F. S.; Santos, T. C.; Maia, S. F. Differences in the storage of soil organic carbon in Brazil's agricultural land: A meta-analysis. **CATENA**, v. 249, p. 108680, fev. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108680>
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA); Ministério do Desenvolvimento Agrário (MDA). Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura. Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Brasília: MAPA/MDA, 2011.
- Mourão, R.; Da Silva. L. E. N. Expansão agrícola no Cerrado: o desenvolvimento do agronegócio no estado de goiás entre 2000 a 2019. **Caminhos de Geografia**. Uberlândia, v. 22, n. 79, p. 01–17, 2021. <https://doi.org/10.14393/RCG227951217>
- Nascimento, H.L.B., Pedreira, B.C., Sollenberger, L.E., Pereira, D.H., Magalhães, C.A.S., Chizzotti, F.H.M., 2019. Physiological characteristics and forage accumulation of grazed Marandu palisade grass (*Brachiaria brizantha*) growing in monoculture and in silvopasture with *Eucalyptus urograndis*. *Crop Pasture Sci* 70, 384–394. <https://doi.org/10.1071/CP18403>.
- Oliveira, A. F. de.; Menezes, G. L.; Gonçalves, L. C.; Araujo, L. C. de.; Ramirez, M. A.; Guimarães, J. R.; Jayme, D. G.; Lana, A. M. Q. Pasture traits and cattle performance in silvopastoral systems with *Eucalyptus* and *Urochloa*: Systematic review and meta-analysis. **Livestock Science**, v. 262, p. 104973, ago. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.104973>
- Polizel, S.P., Vieira, R.M.S.P., Pompeu, J., Ferreira, Y.C., Sousa-Neto, E.R., Barbosa, A.A., Ometto, J.P.H.B., 2021. Analyzing the dynamics of land use in the context of current conservation policies and land tenure in the Cerrado – MATOPIBA region (Brazil). **Land Use Policy** 109, 105713. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105713>.

- Pulrolnik, K.; Viela, L.; Ferreira, C.; Souza, K. W. de. Estoques de carbono e nitrogênio no solo e biomassa florestal em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no cerrado. 2021. www.infoteca.cnptia.embrapa.br
- Ramos, M. L. G.; Melo, R. P. N.; Silva, A. M.; Silva, S.B.; Oliveira, M. P. de. Carbon and nitrogen stocks in cultivation systems of a Quilombola community in the Brazilian Cerrado. **Regional Environmental Change**, v. 22, n. 3, p. 81, 6 jun. 2022. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01941-z>
- Ribeiro, J.F.; Walter, B.M.T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. 1998. In: Sano, S.M. and Almeida, S.P., Eds., Cerrado: Ambiente e Flora, Embrapa-CPAC, Brasília, 89-166.
- Rocha, G. P.; Fernandes, L. A.; Cabacinha.; Lopes, I. D.; Ribeiro, J. M.; Frazão, L. A.; Sampaio, R. A. Caracterização e estoques de carbono de sistemas agroflorestais no Cerrado de Minas Gerais. **Ciência Rural**, v. 44, p. 1197–1203, jul. 2014. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20130804>
- Roscoe, R.; Boddey, R. M. & Salton, J.C. Sistemas de manejo e matéria orgânica do solo. In: Roscoe, R.; Mercante, F.M. & Salton, J.C., orgs. Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: Modelagem matemática e métodos auxiliares. Dourados, **Embrapa Agropecuária Oeste**, 2006. p.17-41.
- Sano, E. E.; Rosa, R.; Scaramuzza, C. A.; Adami, M.; Bolfe, E. L.; Coutinho, A. C.; Esquerdo, J. C. D. M. Land use dynamics in the Brazilian Cerrado in the period from 2002 to 2013. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, p. e00138, 29 abr. 2019. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00138>
- Sisti, C.P.J., Henrique, P., Kohmann, R., 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 Res.** 76, 39–58. <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.08.007>.
- Silva, M. A., Nascente, A.S.; Lanna, A.C.; Rezende, C.C.; Cruz, D.R.C.; Frasca, L.L.M.; Ferreira, A.L.; Duarte, J. R. M.; Filippi, M. C. C. Sistema de plantio direto e rotação de culturas no Cerrado. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, p. e376111335568, 10 out. 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i13.35568>

- Silva, C. A.; Cerri, C. E. P.; Andrade, C. A. De.; Martin-Neto, L.; Bettiol, W. **Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções** 2023. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1161302/1/Andrade-Materia-organica-2023.pdf>
- Silva, L. D. L.; Ribon, A. A.; Backes, C. Carbono e matéria orgânica do solo em sistema de manejo de produção de pastagem: uma revisão sistemática com meta-análise. **Agrarian**, v. 16, n. 56, p. e17176, 29 set. 2023. <https://doi.org/10.30612/agrarian.v16i56.17176>
- Sousa, M. A. de.; Reis, I. A. S.; Almeida, A.P. de.; Rossi, C. Q.; Pereira, M. G.; Pinto, L. A. R.; Silva, C. F.; Santos, O. A. Frações da matéria orgânica em agregados em áreas de terra preta arqueológica, Pará, Brasil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 7, p. 16–23, 10 ago. 2020. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.007.0002>
- Sousa, C. E.S.de.; Junior, F.P.A.; Cardoso, A.da.S.; Cleef, F.de.O.S.V.; Pádua, F.T.de.; Almeida, J.C.de.C. Effects of integrating legumes or trees on soil C stock and organic matter dynamics in tropical grasslands. **Applied Soil Ecology**, v. 202, p. 105560, 1 out. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105560>
- Song, G., Hayes, M.H.B., Novotny, E.H. A two-year incubation study of transformations of crop residues into soil organic matter (SOM) and a procedure for the sequential isolation and the fractionation of components of SOM. **Sci. Total Environ.** 763, 143034.2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143034>.
- Stahl, C., Freycon, V., Fontaine, S., Dez´ecache, C., Ponchant, L., Picon-Cochard, C., Klumpp, K., Soussana, J.-F., Blanfort, V., 2016. Soil carbon stocks after conversion of Amazonian tropical forest to grazed pasture: importance of deep soil layers. **Reg. Environ. Chang.** 16, 2059–2069. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-0936-0>.
- UNFCCC. **4 per 1000 Initiative: Soils for Food Security and Climate**, 2023. Disponível em: https://climateaction.unfccc.int/Initiatives?id=4per1000_Initiative_Soils_for_Food_Security_and_Climate. Acesso em: 18 mar. 2025.
- VIEIRA, Vinícius. **Destaques do Mapeamento Anual de Cobertura e Uso da Terra – Pastagem (1985-2023)**. Versão 06.12.2024. Projeto MapBiomass, 2024.

https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2024/12/Factsheet-Pastagem_C9_05.12_v3.pdf

Vogado, R. F.; Souza, H.A.de.; Sagrilo, E.; Brito, L. de. C. R. de.; Matias, S. S.R.; Neto, M.L.T.; Junior, J.O.L.de.O.; Andrade, H.A.F.de.; Leite, L.F.C. Soil organic carbon stocks and fractions under integrated systems and pasture in the Cerrado of Northeast Brazil. **CATENA**, v. 243, p. 108196, 1 ago. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108196>

Xavier, K. S. Estoque de carbono e nitrogênio em áreas sob diferentes usos e classes do solo no cerrado do oeste baiano. 27 nov. 2023. <https://saberaberto.uneb.br/handle/20.500.11896/5015>

Zeferino, L. B.; Lustosa, F.J.F.; Santos, A.C.Dos.; Cerri, C.E.P.; Oliveira, T. Dos. Soil carbon and nitrogen stocks following forest conversion to long-term pasture in Amazon rainforest-Cerrado transition environment. **CATENA**, v. 231, p. 107346, out. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107346>

CAPÍTULO I: ESTOQUES DE CARBONO, NITROGÊNIO E DAS FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO AGRÍCOLA SUSTENTÁVEIS NO CERRADO

RESUMO

O Cerrado brasileiro tem enfrentado transformações relacionadas com a substituição da mata nativa por sistemas agrícolas, o que afeta a dinâmica dos compartimentos da matéria orgânica do solo e consequentemente os estoques de C e N. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência dos diferentes sistemas de manejo agrícola sustentáveis e cobertura vegetal nos estoques de carbono e nitrogênio no solo, assim como, nas frações granulométricas da MOS no município de João Pinheiro-MG, no bioma Cerrado. Foram selecionadas áreas com diferentes formas de uso (pasto produtivo-PP, integração - lavoura-pecuária-ILP e sistema agroflorestal-SAF) e uma área de mata nativa de Cerrado (MN). Foram abertas 3 trincheiras para cada tratamento e coletadas amostras de terra deformadas e indeformadas até 100 cm de profundidade, nas seguintes camadas: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80, 80-100 cm para avaliação dos estoques de C, N. O fracionamento físico da matéria orgânica foi analisado até a profundidade de 30 cm e foram extraídas as seguintes frações: COP (Carbono Orgânico Particulado) e COAM (Carbono Orgânico Associado aos Minerais). Os resultados foram submetidos a análise de variância e, posteriormente, o teste de comparação de médias pelo teste de Tukey à 5% de significância. A densidade do solo foi superior no sistema de manejo SAF quando comparada com os demais manejos e MN. Para o estoque de C, a mata nativa apresentou valores estatisticamente iguais ao ILP, sugerindo que a substituição da mata por ILP não altera os estoques de C no solo. Por outro lado, os estoques de N na mata nativa foram estatisticamente iguais a PP e ILP, exceto na camada 0-100 cm onde apresentou baixo valor (8,47 Mg ha⁻¹). O estoque de COP para a mata nativa foi inferior em comparação aos sistemas de manejo, evidenciando que a substituição da mata pelos sistemas de manejo pode contribuir para maior aporte do COP no solo. Em contrapartida, no estoque de COAM a mata nativa apresentou maior aporte de COAM não diferindo do ILP, exceto na camada 20-30 cm onde o ILP foi menor estatisticamente, mostrando que no sistema de manejo ILP há maior estabilização do C na fração mineral, dessa forma a substituição do MN por ILP não irá afetar no aporte de C na fração COAM nos primeiros 20 cm de profundidade. Conclui-se que, a conversão da mata nativa de Cerrado para ILP e PP aumentam os estoques de C e N no solo, destacando o potencial desses sistemas de manejo sustentável para a manutenção e melhoria da qualidade do solo. Cabe ressaltar que a pesquisa não está recomendando a retirada da MN de Cerrado para o uso agropecuário, mas uma vez que houve a mudança no uso da terra, a produção agropecuária utilizando práticas de manejo sustentáveis, como ILP e PP, são as mais indicadas para a condição do Cerrado brasileiro.

Palavras-chaves: Matéria orgânica do solo, COP, COAM, gases de efeito estufa, *Urochloa spp.*

ABSTRACT

The Brazilian Cerrado has undergone transformations due to the replacement of native vegetation with agricultural systems, affecting the dynamics of soil organic matter (SOM) compartments and consequently C and N stocks. The objective of this study was to evaluate the influence of different sustainable agricultural management systems and vegetation cover on soil carbon and nitrogen stocks, as well as on the granulometric fractions of SOM in João Pinheiro-MG, within the Cerrado biome. Areas with different land uses were selected: productive pasture (PP), crop-livestock integration (CLI), agroforestry system (AFS), and a native Cerrado area (NV). Three trenches were opened for each treatment, and deformed and undisturbed soil samples were collected up to 100 cm depth in the following layers: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80, and 80-100 cm for C and N stock assessment. Physical fractionation of organic matter was analyzed up to 30 cm depth, extracting the following fractions: POC (Particulate Organic Carbon) and MAOC (Mineral-Associated Organic Carbon). The results were subjected to analysis of variance (ANOVA), followed by Tukey's test at 5% significance for mean comparison. Soil bulk density was higher in the AFS system compared to other management systems and NV. For C stocks, NV showed statistically similar values to CLI, suggesting that replacing native vegetation with CLI does not alter soil C stocks. On the other hand, N stocks in NV were statistically equal to PP and CLI, except in the 0-100 cm layer, where NV had a lower value (8.47 Mg ha⁻¹). The POC stock in NV was lower compared to management systems, indicating that replacing native vegetation with agricultural systems may contribute to higher POC input. Conversely, in MAOC stocks, NV showed higher contributions, with no significant difference from CLI except in the 20-30 cm layer, where CLI was statistically lower. This demonstrates that the CLI system promotes greater C stabilization in the mineral fraction, meaning that replacing NV with CLI does not negatively affect MAOC stocks in the top 20 cm of soil. In conclusion, the conversion of native Cerrado vegetation to CLI and PP increases soil C and N stocks, highlighting the potential of these sustainable management systems for maintaining and improving soil quality. It is important to note that this study does not advocate for the removal of native Cerrado vegetation for agricultural use. However, once land-use change has occurred, agricultural production using sustainable practices such as CLI and PP is the most recommended approach for the Brazilian Cerrado conditions.

Keywords: Soil organic matter, POC, MAOC, greenhouse gases, *Urochloa* spp

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios ambientais da atualidade, sendo impulsionadas principalmente pelo aumento das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) (MCTI, 2016). No Brasil, o sector agropecuário é responsável por 74% das emissões brutas de GEE, com destaque para a conversão de ecossistemas naturais em áreas agrícolas e pastagens (SEEG, 2023). A liberação de carbono para a atmosfera ocorre principalmente pela degradação do solo e revolvimento da terra em sistemas convencionais, queimadas, que intensificam a perda da matéria orgânica do solo e contribuindo para a crise climática global (Filho et al., 2024).

Entretanto, a conversão de áreas nativas para sistemas agrícolas convencionais tem causado desmatamento acelerado, degradação do solo e perdas significativas nos estoques de carbono e nitrogênio (Xavier, 2023). Em 2023, o Cerrado perdeu mais de 1,1 milhão de hectares de vegetação nativa, superando pela primeira vez a taxa de desmatamento da Amazônia (Perreiras e Bolfe, 2022). Esse avanço desordenado da agropecuária provoca erosão do solo, redução da fertilidade, compactação e diminuição da capacidade do solo em atuar como reservatório de carbono (Oliveira et al., 2022).

Diante desse cenário, estratégias de manejo sustentável surgem como alternativas para minimizar os impactos ambientais da agropecuária. Práticas como integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), sistemas agroflorestais (SAFs) e pastagens produtivas são incentivadas pelo Plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono) e pelo ABC+, com o objetivo de promover o sequestro de carbono, reduzir as emissões de GEE e conservar a qualidade do solo (Brasil, 2022).

O armazenamento de carbono e nitrogênio no solo é essencial para a mitigação das mudanças climáticas e para a manutenção da fertilidade dos solos agrícolas. O carbono orgânico do solo (COS) é um dos principais componentes da MOS e influencia diretamente a capacidade produtiva e a resiliência dos agroecossistemas (Sisti et al., 2004). O nitrogênio, por sua vez, é um nutriente-chave para o crescimento das plantas, sendo altamente impactado pelas práticas de manejo adotadas. A MOS pode ser dividida em frações lábil e estável, sendo a fração lábil (carbono orgânico particulado - COP) um indicativo sensível das mudanças no uso da terra, enquanto a fração estável (carbono

orgânico associado aos minerais - COAM) representa o estoque de longo prazo, essencial para a estabilidade do carbono no solo (Karhu et al., 2019).

Com base nesses pressupostos, a hipótese deste estudo é que os sistemas agrícolas sustentáveis, como ILP, SAF e pastagem produtiva, promovem maior conservação da MOS e aumentam os estoques de carbono e nitrogênio no solo de forma estável quando comparados a sistemas convencionais.

Este estudo teve como objetivo avaliar a influência de diferentes sistemas de manejo agrícola sustentável e da cobertura vegetal nos estoques de carbono e nitrogênio, bem como nos estoques das frações lábil e estável da MOS, no município de João Pinheiro-MG, no bioma Cerrado. Os resultados contribuirão para uma maior compreensão dessas práticas e no desenvolvimento de estratégias para mitigação das mudanças climáticas no setor agropecuário

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização da área de estudo

O estudo foi conduzido em uma fazenda localizada no município de João Pinheiro, pertencente a microrregião de Paracatu, no Noroeste de Minas Gerais (Figura 1). Essa propriedade está inserida no bioma Cerrado, entre as coordenadas geográficas: 17° 12' 39,6'' Sul e 46° 20' 24'' Oeste; 17° 39' Sul e 46° 10' 33,6'' Oeste. A altitude média é de 532 metros. A precipitação pluviométrica anual de, aproximadamente, 1.200 mm. O clima é tropical úmido e seco de savana (Aw), de acordo com a classificação de Köppen, com meses mais secos durante o inverno (Alvares, 2013). O solo foi classificado como Latossolo.

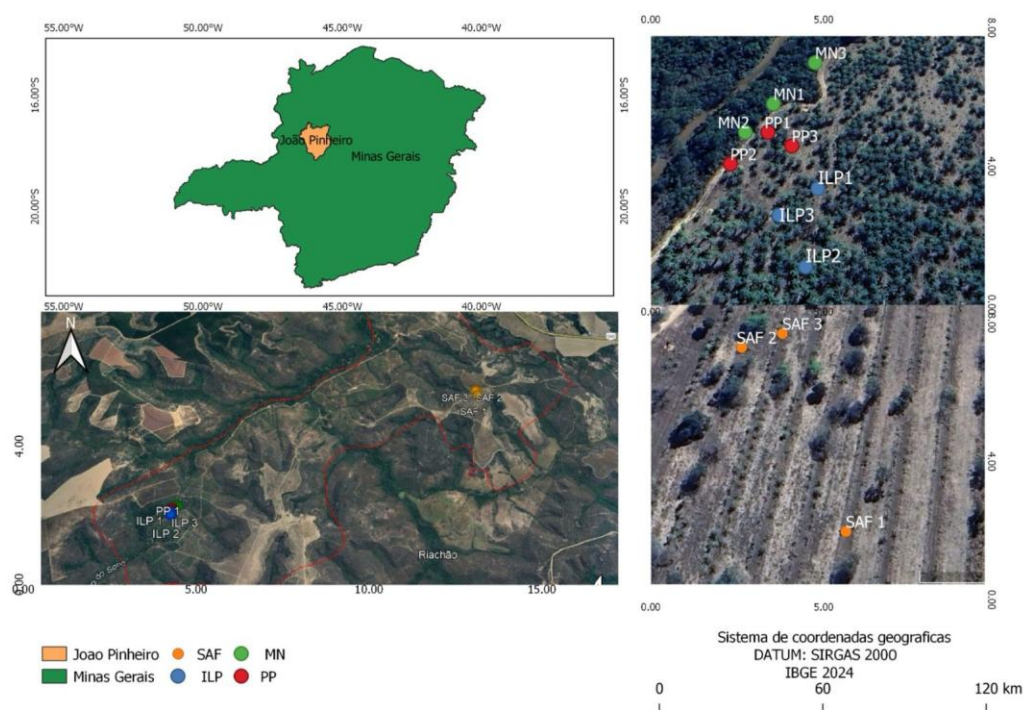


Figura 1. Localização dos pontos de coleta na fazenda estudada para os três sistemas de manejo agrícola e a mata nativa, no município de João Pinheiro (MG). MN: Mata Nativa (verde); ILP: Integração Lavoura-Pecuária (azul); SAF: Sistema Agroflorestal (laranja); PP: Pasto Produtivo (vermelho).

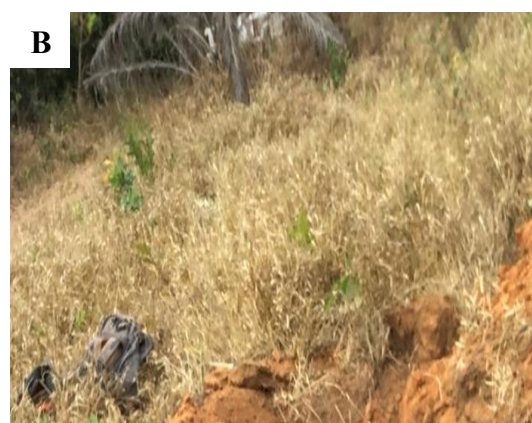
2.2 Histórico da área experimental e tratamentos avaliados

No local de estudo, foram selecionados três sistemas de manejo de solo distintos, nomeadamente: Pasto produtivo, Integração Lavoura-pecuária, Sistema Agroflorestal, e

a Mata Nativa como área de referência, com o respectivo histórico para cada um (Tabela 1, Figura 2).

Tabela 1. Histórico da área da fazenda para os três sistemas de manejo agrícola sustentável e a área de mata nativa.

Tratamentos	Histórico da área
Mata nativa (MN)	Área de referência, com vegetação natural do Cerrado, caracterizada como Mata Ciliar, próximo do rio Sono. (Figura 2A).
Pasto produtivo (PP)	Pastagem produtiva com braquiária <i>Urochloa spp.</i> implantada em 2008, totalizando quatorze anos de PP no momento da amostragem de terra. O PP estava num período de seca intensa no momento da coleta, sendo evidenciado pela cor do pasto na Figura 2B.
Integração Lavoura-pecuária (ILP)	Sistema de manejo integrado de macaúba e pastagem com braquiária <i>Urochloa spp.</i> , implantada desde 2016, totalizando seis anos de ILP no momento da amostragem de terra (Figura 2C).
Sistema Agroflorestal (SAF)	Área de cultivo de mandioca, macaúba e braquiária <i>Urochloa spp.</i> implantadas nos finais de 2015, totalizando sete anos de implantação no momento da amostragem de terra. (Figura 2D).



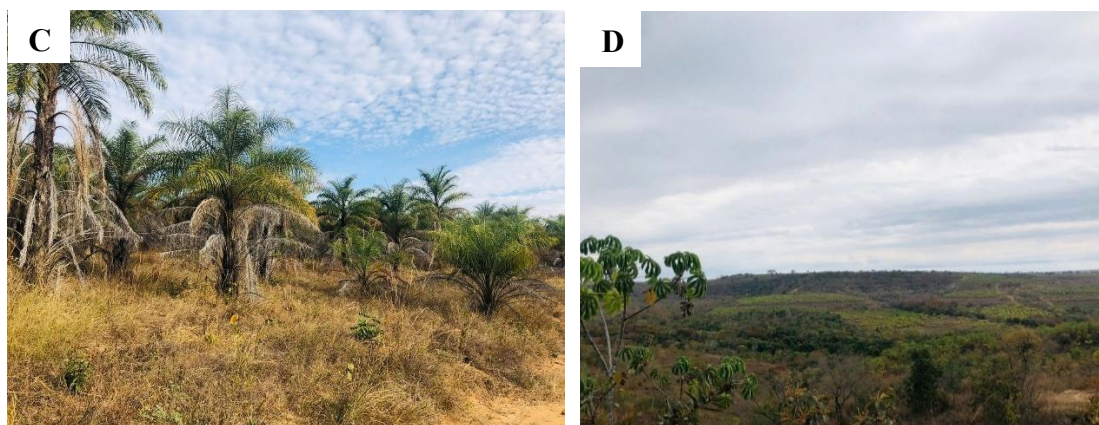


Figura 2. Uso de solo da Fazenda Espelho sob A- Mata Nativa (MN), B- Pasto produtivo (PP), C- Integração Lavoura Pecuária (ILP) e D- Sistema Agroflorestal (SAF).

2.3 Delineamento Experimental

O estudo foi realizado no dia 09 de agosto de 2022, utilizando o delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), com 4 tratamentos (MN, PP, ILP e SAF) e 3 repetições (3 trincheiras em cada tratamento), totalizando 12 trincheiras. Nas trincheiras foram realizadas amostragens de solo em oito profundidades.

2.4 Coleta das amostras de solo deformadas e indeformadas

O monitoramento do carbono (C) e nitrogênio (N) no solo foi conduzido seguindo as diretrizes do Protocolo de Medição, Relato e Verificação (MRV), recomendado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2020).

Para a quantificação dos teores de C e N, da densidade do solo, das análises químicas (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Al^{+3} e pH em água), físicas (granulometria) e fracionamento físico foram abertas trincheiras até 100 cm (profundidade) x 1,2 (largura) x 1,5 m (comprimento) e coletadas amostras indeformadas e deformadas de solo. A coleta das amostras de terra foi feita nas seguintes profundidades: 0- 5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40- 60, 60-80 e 80-100 cm. A coleta das amostras indeformadas foi realizada utilizando anéis de Kopecky (volume de 88,31 cm³), em cada profundidade avaliada, do perfil do solo de forma cuidadosa com o auxílio do martelo pedológico. As amostras indeformadas de terra, para a determinação da densidade do solo, foram coletadas nas mesmas profundidades em apenas uma parede da trincheira do perfil de solo. Na mesma trincheira, foi realizada a coleta de amostras deformadas de terra, nas quatro paredes da trincheira, de aproximadamente 2 kg de solo, formando uma amostra composta em cada profundidade citada. As amostras de terra foram transferidas para sacos plásticos,

previamente identificados e etiquetados com as seguintes informações: município, a fazenda, as coordenadas geográficas, tipo de amostra, profundidade e a data da coleta. Todas as amostras foram coletadas sempre iniciando da maior profundidade (80-100 cm) para a menor de modo a evitar a contaminação.

Foram realizadas três repetições (trincheiras) para cada tratamento. Por fim, as amostras de terra foram transportadas para o ‘Laboratório de Matéria Orgânica do Solo’, no Departamento de Agrotecnologias e Sustentabilidades da UFRRJ para a execução das análises físicas e químicas de solo.

2.5 Preparo das amostras de terra e análises físicas e químicas do solo

As amostras de terra deformadas foram secas ao ar, destorroadas e tamisadas em peneiras de diâmetro de 2,0 mm para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Após a obtenção da TFSA, foram realizadas as análises químicas e físicas do solo (granulométrica e densidade do solo).

Para as análises químicas, determinou-se os teores de alumínio, cálcio, magnésio e o pH do solo. Todas as análises físicas e químicas do solo foram realizadas de acordo com o Manual e Métodos de Análises de Solo, proposta pela Embrapa (2017). Em seguida, foram realizadas as análises físicas de densidade do solo, onde todo o conteúdo de terra, contido no anel volumétrico, foi transferido para cadinhos de alumínio, previamente pesados, e colocados em estufa à 105 °C, por 48h. Após esse período, os cadinhos foram retirados e colocados em dessecadores e depois pesados para a obtenção da massa seca de solo. A densidade do solo foi obtida usando a equação (1).

$$D_s = \frac{M_s}{V_t} \quad (1)$$

Onde: M_s - Massa seca de solo à 105 °C, durante 48 h; V_t – Volume total, equivalente ao volume do anel de Kopecky (88,31 cm³).

2.6 Determinação do Carbono Orgânico Particulado e do Carbono Orgânico Associado aos Minerais

O fracionamento físico de matéria orgânica do solo foi feito utilizando a metodologia proposta por Cambardella e Elliot (1992), nas seguintes profundidades: 0-5, 5-10, 10-20 e 20- 30 cm. Inicialmente, foram transferidos 10 g de TFSA, em tubos falcon e adicionados 30 mL da solução de hexametáfosfato de sódio (5g L⁻¹). Em seguida, as amostras foram agitadas por 15 horas num agitador horizontal e todo o conteúdo contido no tubo lavado com água destilada e tamisado em uma peneira de abertura de classe de

53 µm (0,053 mm). O material que ficou retido na peneira foi transferido para placa de *Petri*, previamente pesada, foi seco em estufa à 50°C (para que não houvesse a perda do carbono e nitrogênio lábil), por aproximadamente 72 h. Após a secagem, a amostra foi finamente moída e passada em peneira de 100 mesh (0,149 mm) (Smith e Myung, 1990) para a determinação dos teores de C e N na fração carbono orgânico particulado (COP). O material que passou através da peneira de 53 µm, corresponde à carbono orgânico associada aos minerais (COAM) e ao carbono orgânico solúvel em água. O COAM foi calculado através da diferença entre os teores de C e N total do solo e os teores de C e N na fração do COP.

2.7 Determinação dos Teores e Estoques de Carbono e Nitrogênio Total e das Frações COP e COAM

Foram feitas análises dos teores de nitrogênio e carbono total nas amostras de terra coletadas até 100 cm de profundidade, segundo a metodologia de Nelson e Sommer (1996). As amostras de TFSA foram finamente moídas até atingir granulometria de 100 mesh (0,149 mm), seguindo a recomendação de Smith e Myung (1990) e, analisadas via combustão seca, no analisador automático de carbono, hidrogênio e nitrogênio (CHN). Através dos resultados obtidos nas análises dos teores de C e N, assim como o de densidade do solo, foram calculados os estoques de C e N total nas camadas de 10 cm, 30 cm e 100 cm. Foi feita a correção da massa de solo para o cálculo do estoque de C e N, de acordo com o recomendado por Sisti et al. (2004). O estoque de carbono e nitrogênio foi calculado utilizando a seguinte equação (2).

$$C_s = \sum_{i=1}^{n-1} C_{Ti} + [M_{Tn} - (\sum_{i=0}^n M_{Ti} - \sum_{i=0}^n M_{Si})C_{Tn}] \quad (2)$$

Onde: C_s = Estoque de carbono (Mg C ha⁻¹); CTi = Soma do conteúdo total de C da camada 1 (superfície) à camada n-1 (penúltima) do perfil correspondente ao tratamento; MTn = massa do solo na última camada do perfil do tratamento; MTi = soma da massa do solo (Mg ha⁻¹) da camada 1 à camada n (maior profundidade) do perfil do tratamento; MSi = soma da massa de solo da camada 1 à camada n (maior profundidade) no perfil de referência; CTn = concentração de carbono (Mg de C Mg de solo) na camada mais profunda no perfil de tratamento.

2.8 Análise Estatística

Realizou-se a análise estatística dos dados, através da análise de variância (ANOVA), o teste de normalidade (Shapiro-Wilk), o teste de homoscedasticidade (Bartlett) e o teste

de comparação das médias usando o pacote Exp.Des onde foi feito o teste de Tukey e Scoot-Knott (no caso de ambiguidade nos dados) à 5% de significância, utilizando o *software* R versão 4.3.3 (Beagle Scouts Fevereiro, 2024).

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, encontram-se representados os dados referentes a análise granulométrica do solo. A classificação textural dos solos é, predominantemente, franco-arenosa para MN, PP e ILP com valores médios de areia variando de 503 a 815 g kg⁻¹ e, areia franca a franco-arenosa para o tratamento SAF com valores médios de areia variando de 752 a 865 g kg⁻¹ em todas as profundidades avaliadas, de acordo com o Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (Lemos e Santos, 2015). De acordo com Ramos et al. (2023) os solos com alto teor de areia dificultam a retenção de MOS, devido a baixa superfície específica para a estabilização do carbono, tornando-o mais suscetível à mineralização.

Tabela 1. Análise granulométrica do solo sob diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).

Cobertura Vegetal	Profundidade (cm)	Areia (g kg ⁻¹)	Argila (g kg ⁻¹)	Silte	Textura do solo
MN	0-5	781	140	79	Franco-arenosa
	5-10	729	150	121	Franco-arenosa
	10-20	767	156	77	Franco-arenosa
	20-30	768	169	63	Franco-arenosa
	30-40	815	165	20	Franco-arenosa
	40-60	705	200	95	Franco-arenosa
	60-80	723	226	51	Franco-arenosa
	80-100	699	224	57	Franco-arenosa
PP	0-5	749	177	74	Franco-arenosa
	5-10	750	185	65	Franco-arenosa
	10-20	702	179	119	Franco-arenosa
	20-30	733	195	85	Franco-arenosa
	30-40	721	213	66	Franco-arenosa
	40-60	725	215	60	Franco-arenosa
	60-80	693	229	76	Franco-arenosa
	80-100	660	245	95	Franco-arenosa
ILP	0-5	698	213	88	Franco-arenosa
	5-10	690	218	92	Franco-arenosa
	10-20	653	234	113	Franco-arenosa
	20-30	620	248	132	Franco-arenosa
	30-40	603	264	133	Franco-arenosa
	40-60	505	312	183	Franco-arenosa
	60-80	503	293	204	Franco-arenosa
	80-100	514	285	201	Franco-arenosa
SAF	0-5	865	100	35	Areia franca
	5-10	834	98	69	Area franca
	10-20	840	109	51	Area franca
	20-30	803	124	63	Area franca
	30-40	800	141	59	Area franca
	40-60	801	137	62	Area franca
	60-80	752	165	84	Franco-arenosa
	80-100	748	190	62	Franco-arenosa

3.1 Densidade do Solo

A densidade do solo (D_s) apresentou variações significativas em função da profundidade e do sistema de manejo avaliado (Figura 3). De modo geral, observou-se que a D_s tende a aumentar com a profundidade, o que é esperado devido à maior compactação natural em camadas mais profundas. No entanto, esse padrão não se aplica de forma uniforme a todos os sistemas de manejo, com exceção do ILP e PP, por apresentarem comportamentos distintos nas últimas camadas.

A MN destaca-se por apresentar menores valores de densidade do solo em todas as profundidades analisadas, refletindo as condições naturais do solo, com elevado teor de matéria orgânica, boa porosidade e ausência de manejo intensivo. Na camada superficial (0-10 cm), a MN apresentou valores significativamente menores de D_s em comparação aos sistemas manejados, indicando menor compactação nesta camada. Essa diferença é particularmente evidente nos primeiros 20 cm.

Nos sistemas de manejo PP e ILP, os valores de D_s variam entre 1,26 e 1,49 Mg m^{-3} , com os maiores valores observados na camada de 0-40 cm. Esses sistemas apresentaram densidades significativamente maiores em relação à MN nas camadas superficiais (0-10 cm), sugerindo maior compactação associada ao uso de maquinários ou animais. A partir da camada de 20-30 cm, no entanto, as diferenças entre PP, ILP e MN tornam-se menos pronunciadas, com valores de D_s convergindo.

O SAF apresentou valores de D_s superiores em relação aos demais manejos, com valores na faixa de 1,46 a 1,63 Mg m^{-3} . Nesse sistema, os maiores valores são observados entre 10 e 100 cm de profundidade, enquanto o menor valor ocorre nos primeiros 5 cm do perfil do solo. Esse aumento de D_s em profundidade está associado à compactação resultante do manejo.

Conforme Sabino et al. (2023), os valores críticos de densidade do solo para solos de textura franco-arenosa variam entre 1,70 e 1,80 Mg m^{-3} . Os resultados obtidos para o solo em estudo encontram-se abaixo desse intervalo, indicando que, apesar do aumento da D_s em profundidade, o solo ainda não atingiu níveis críticos de compactação. No entanto, o aumento da D_s pode ocasionar limitações, como o impedimento à penetração de raízes e dificuldades no preparo do solo, conforme destacado por Almeida (2019).

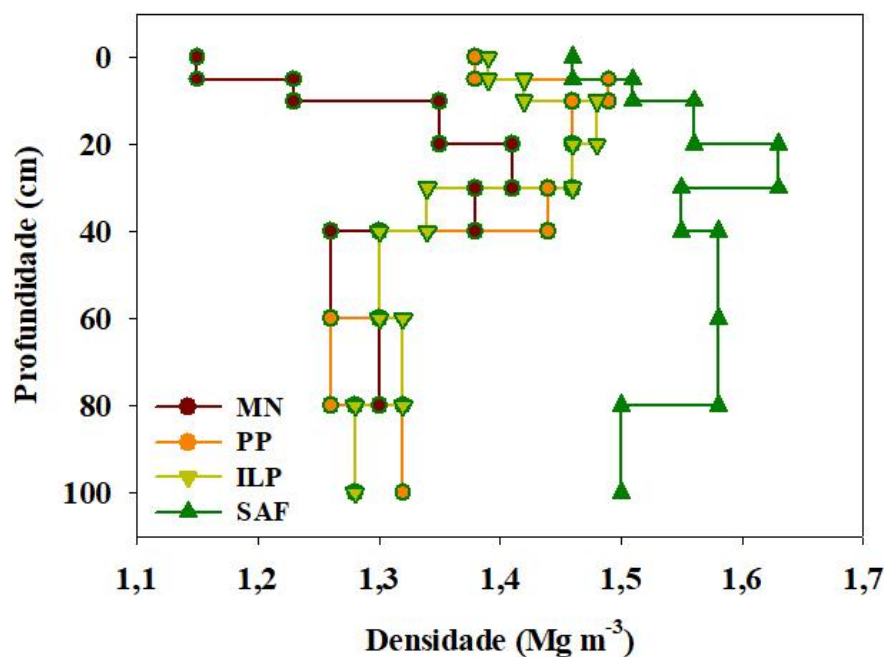


Figura 3. Valores de densidade do solo (Mg m^{-3}) sob os diferentes sistemas de manejo agrícola sustentável e mata nativa, em João Pinheiro (MG).

3.2 Análise Química do Solo

A análise química do solo mostrou variações significativas nos valores de pH e teores de cátions trocáveis (Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+}) em diferentes profundidades nos sistemas de manejo agrícola e mata nativa (Tabela 4).

Na MN o pH, variou de 4,68 a 5,37, com os valores mais baixos observados nas camadas de 20-40 cm. Esse padrão reflete as condições naturais de acidez do solo sob vegetação nativa, onde não há correção com calcário. Em contrapartida, nos sistemas de manejo agrícola PP, ILP e SAF, o pH é mais elevado, variando de 4,76 a 6,33, devido à aplicação de calcário para correção da acidez do solo. O sistema ILP destacou-se com os maiores valores de pH nas camadas 0-30 cm, evidenciando o efeito da calagem nesse sistema.

Os teores de alumínio trocável (Al^{3+}) na MN, aumentaram com a profundidade, variando de $0,26 \text{ cmolc kg}^{-1}$ na camada de 0-5 cm para $1,74 \text{ cmolc kg}^{-1}$ em 40-60 cm, refletindo a acidez natural do solo sob vegetação nativa. Nos sistemas manejados, os teores de Al^{3+} foram, significativamente, menores nas camadas superficiais (0-5 cm), variando de $0,03$ a $0,16 \text{ cmolc kg}^{-1}$, indicando a eficácia da calagem na precipitação do alumínio nessa camada. No entanto, em profundidades maiores (20-60 cm), os teores de Al^{3+} aumentaram, especialmente no PP e ILP, atingindo valores de até $1,44$ e $1,59 \text{ cmolc}$

kg⁻¹, respectivamente. O SAF apresentou os menores teores de Al³⁺ em todas as profundidades avaliadas, apresentando um valor máximo de 0,23 cmolc kg⁻¹.

Os teores de Ca²⁺ na MN, foram consistentemente baixos, variando de 0,20 a 1,79 cmolc kg⁻¹, o que é esperado em solos não corrigidos. No sistema ILP, foram mais elevados, atingindo 3,39 cmolc kg⁻¹ na camada de 0-5 cm, refletindo o efeito da aplicação da calagem nesse sistema. No PP, os valores de Ca²⁺ variaram de 2,67 cmolc kg⁻¹ na camada superficial a 0,13 cmolc kg⁻¹ em 80-100 cm. O SAF apresentou teores de Ca²⁺ mais baixos, com o maior valor registrado na camada de 0-5 cm de 1,83 cmolc kg⁻¹.

Os teores de Mg²⁺ seguiram um padrão semelhante ao de Ca²⁺, com valores mais elevados nos sistemas manejados haja visto que foi aplicado o calcário dolomítico, que fornece não apenas cálcio, como também magnésio ao solo. Na MN, os teores de Mg²⁺ variaram de 1,55 a 2,09 cmolc kg⁻¹, com menor variação em profundidade, indicando a contribuição da matéria orgânica para a manutenção desses cátions no perfil do solo. O sistema ILP foi o que apresentou o maior teor de magnésio na camada de 0-5 cm (3,39 cmolc kg⁻¹). No PP e SAF, os teores de Mg²⁺ nas camadas superficiais variaram entre 2,12 e 2,31 cmolc kg⁻¹, reduzindo em profundidade.

Tabela 2. Resultados da análise química do solo sob diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).

Cobertura Vegetal	Profundidade (cm)	pH	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
		(H ₂ O)	(cmolc kg ⁻¹ solo)		
MN	0-5	5,37	0,26	1,79	2,09
	5-10	4,86	0,68	0,73	2,08
	10-20	4,74	1,55	0,30	1,82
	20-30	4,68	1,48	0,30	1,92
	30-40	4,68	1,64	0,27	1,75
	40-60	4,73	1,74	0,42	1,55
	60-80	4,81	1,71	0,20	1,72
	80-100	4,94	1,66	0,35	1,69
PP	0-5	5,81	0,16	2,67	2,31
	5-10	5,40	0,38	1,19	2,24
	10-20	5,22	1,05	0,70	2,09
	20-30	4,89	1,44	0,49	2,18
	30-40	4,76	1,24	0,40	2,00
	40-60	4,79	1,23	0,37	2,05
	60-80	5,02	1,28	0,33	1,91
	80-100	4,94	1,27	0,13	2,06
ILP	0-5	6,21	0,03	3,39	3,39
	5-10	5,83	0,03	2,38	2,14
	10-20	5,39	0,78	0,96	2,52
	20-30	5,09	0,95	0,54	2,40
	30-40	5,27	1,5	0,45	2,44
	40-60	5,00	1,59	0,55	2,39
	60-80	5,17	1,55	0,16	2,15

	80-100	5,34	1,45	0,38	1,84
SAF	0-5	6,33	0,03	1,83	2,12
	5-10	5,84	0,03	0,81	3,00
	10-20	5,41	0,10	1,47	1,70
	20-30	5,22	0,2	0,53	1,63
	30-40	4,80	0,23	0,40	1,70
	40-60	4,72	0,10	0,35	1,43
	60-80	4,88	0,13	0,30	1,73
	80-100	5,05	0,07	0,37	1,73

3.3 Teores de C e N no solo

Na Figura 3 estão apresentados os valores dos teores de carbono e nitrogênio no solo sob diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa. Como era de se esperar, a distribuição do C no perfil do solo apresenta maiores valores na camada superficial (0-5 cm) e uma redução nas camadas inferiores (80-100 cm), em todos os tratamentos avaliados. A substituição de MN por PP, ILP não acarretou na redução dos teores de C ao longo do perfil, exceto na camada de 0-5 cm e 40-60 cm.

O ILP em comparação com PP e SAF apresentou valores maiores de C, apesar do tempo de adoção desse manejo ser reduzido em relação ao PP, O ILP é maior que o PP somente nas profundidades de 0-5 e 10-20 cm. Nas demais profundidades não há diferença entre esses sistemas de manejo. A partir de 20 cm, esses sistemas também não diferenciam da MN, exceto 40-60 cm, onde a retirada da MN para a entrada de agricultura reduz os teores de C no solo.

Os teores de N, com a substituição de MN por sistemas de manejo teve o mesmo comportamento que o C, apresentando a redução em profundidade. Os maiores teores foram observados na ILP em comparação com o PP e SAF.

O mesmo foi evidenciado por Leite et al. (2013) em seu estudo que conclui que o sistema integrado de braquiária e macaúba contribui para o aumento dos teores de C e N no solo, bem como da fertilidade. Os autores afirmam ainda que os maiores teores de C e N observados nas camadas superficiais podem ser atribuídos ao acúmulo de resíduos de macaúba depositados sobre o solo. Além disso, as gramíneas perenes, que compõem as pastagens, possuem sistemas radiculares abundantes e promovem elevada rizodeposição, com distribuição uniforme de substâncias liberadas no solo, favorecendo a manutenção dos teores de matéria orgânica.

No Cerrado brasileiro, especificamente no estado de Goiás, foram observados aumentos de até 40% no teor de carbono do solo em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária (ILP) quando comparados a áreas que adotam o sistema de plantio direto, segundo Gazolla et al. (2015). Além disso, pesquisas realizadas no Cerrado por Soares et

al. (2019) e Sousa et al. (2020) também indicam melhorias no conteúdo de carbono e seus compartimentos no solo com a implementação do ILP. Essas pesquisas, corroboram os resultados deste estudo, evidenciando que o ILP proporciona maiores teores de carbono em comparação com os demais manejos avaliados.

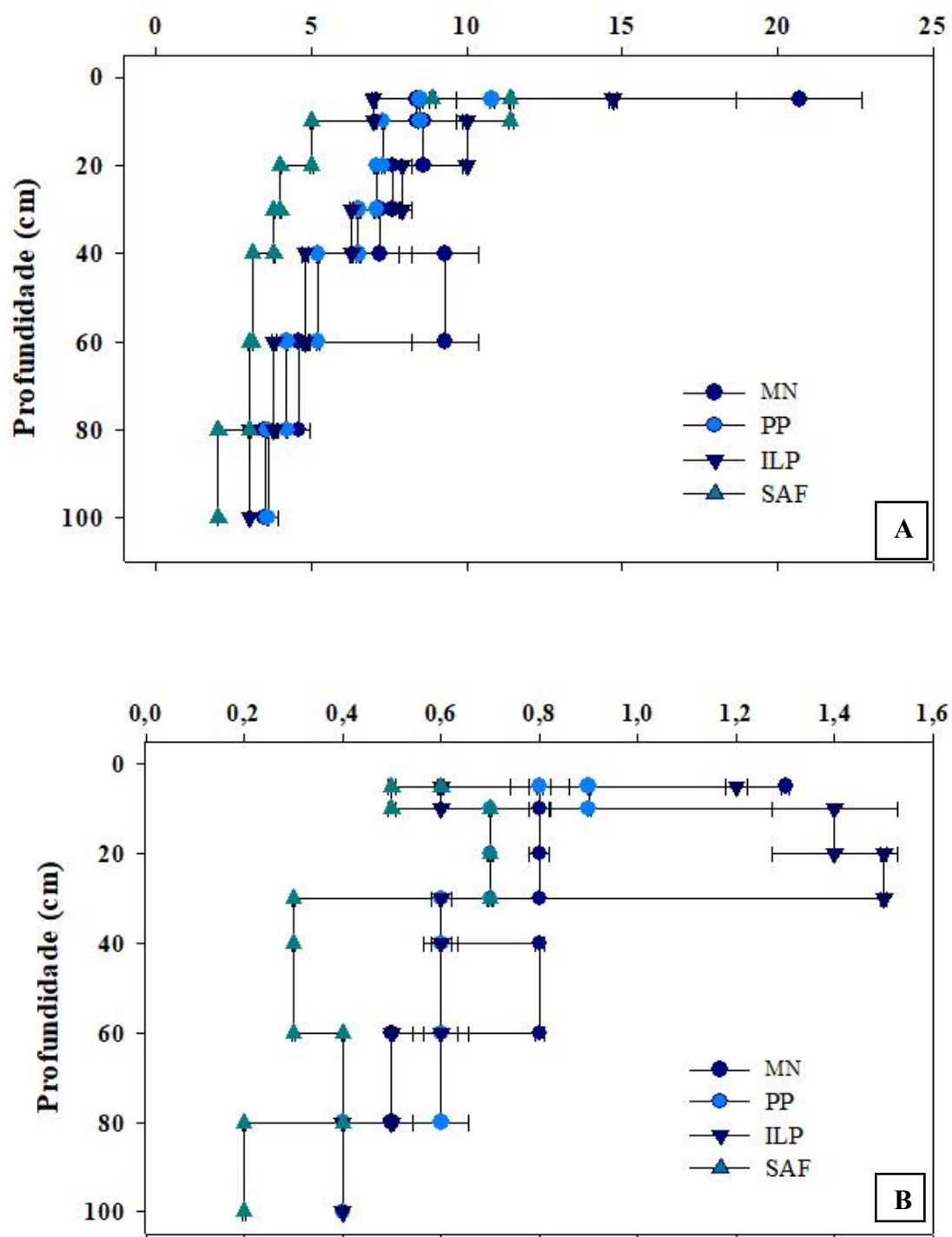


Figura 4. Resultado dos teores de carbono (A) e nitrogênio no solo (B), sob os diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).

3.4 Relação carbono/nitrogênio do Solo

Na Tabela 7 estão apresentados os valores da relação carbono/nitrogênio(C/N) referentes aos sistemas de manejo agrícola e mata nativa. A relação C/N foi superior na camada de 0-5 cm para todos os sistemas de manejo e a Mata nativa, sugerindo que nessa camada há deposição de resíduos vegetais novos que possuem maior razão C/N, reduzindo em profundidade, exceto no SAF, que apresentou maior valor (23) da relação C/N na camada 5-10, isso pode ser explicado pela deposição de resíduos lenhosos ou pela decomposição mais lenta de matéria orgânica nesse sistema de SAF.

Abaixo de 40 cm de profundidade, a relação C/N foi próxima a do húmus do solo que apresenta relação C/N igual a 10 (varia de 8-12). Isso demonstra que o carbono no solo se encontra humificado, estável, sendo mais difícil a sua perda por mineralização.

No PP, a relação C/N tende a ser mais equilibrada, com valores mais próximos entre as diferentes profundidades. O sistema de integração lavoura-pecuária apresentou a menor relação C/N nas camadas de 10-30cm e 40-100cm, o que pode ser atribuído à humificação da MOS. No caso da MN, observamos que a relação C/N é mais alta nas camadas superiores com uma diminuição ao longo do perfil do solo, refletindo uma maior estabilidade da matéria orgânica do solo, característica dos ecossistemas naturais (Bieluczyk et al., 2020; Lammel et al., 2017). A relação C/N é um indicador chave da decomposição e estabilização da matéria orgânica no solo. Ela reflete a capacidade dos microrganismos de degradar resíduos orgânicos, o grau de humificação da matéria orgânica e sua estabilidade no solo.

De acordo com Souza Nunes et al. (2011) matérias vegetais com relações C/N altas indicam decomposição lenta e maior resistência do material, que pode contribuir para a formação de húmus e estabilidade do carbono no solo, como observado nas primeiras camadas dos sistemas de manejo e MN. Por outro lado, materiais vegetais com relações C/N baixas resultam em rápida mineralização, fornecendo nutrientes mais rapidamente (Troian et al., 2020), como evidenciado nas camadas mais profundas para todos sistemas de manejo e MN.

Tabela 3. Valores da relação C/N do solo sob os diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).

Profundidade (cm)	MN	PP	ILP	SAF
0-5	16	14	12	15
5-10	11	9	12	23
10-20	11	10	7	7
20-30	10	10	5	6
30-40	12	11	11	13
40-60	12	9	8	10
60-80	9	7	8	8
80-100	9	9	8	10

3.5 Estoques de C e N no solo

Ao analisar os estoques de carbono e nitrogênio no solo verifica-se que houve diferenças significativas de acordo com o uso da terra e em profundidades (Tabela 6 e 7). Com relação aos valores de estoque de C, os resultados variaram entre 51,98 e 99,25 Mg C ha⁻¹ nos tratamentos avaliados, para a camada 0-100 cm. Com relação aos estoques de N, para essa mesma camada, os resultados variaram entre 0,87 e 9,70 Mg N ha⁻¹. Esses resultados estão dentro da faixa dos valores observados nos solos do Cerrado

A substituição de MN para agricultura que adota o sistema ILP não altera os estoques de C no solo em todas as camadas analisadas. A área de referência, MN de Cerrado, e o sistema de ILP apresentaram os maiores valores de estoque de C em todas as camadas analisadas, exceto na camada de 0-10 cm na qual o sistema PP foi estaticamente igual. Analisando somente os sistemas de manejo agrícola, o SAF apresentou os menores estoques de C em todas as camadas avaliadas.

Para o estoque de N, a MN apresentou valores estatisticamente iguais ao PP e ILP, exceto na camada de 0-100 cm, com valor de 8,46 Mg N ha⁻¹. O SAF também apresentou os menores valores de estoque de N em todas as camadas analisadas. A retirada da MN para a entrada de cultivo agrícola sob sistema ILP e PP não somente altera os estoques de N, mas também aumenta quando considera a camada de 0-100 cm.

Os maiores estoques de C e N observados em áreas sob o sistema ILP são, provavelmente, atribuídos ao consórcio de macaúba com braquiária, o que pode levar a uma maior quantidade de resíduos de plantas, de diferentes qualidades, no solo (Leite et al., 2013; Mateus et al., 2020).

Lopes (2024) observou valor de 6% proteína bruta na macaúba e 21% de C no processamento do fruto da macaúba. A macaúba *Acrocomia aculeata* se destaca por ser a espécie de maior ocorrência geográfica do gênero e por apresentar elevado teor de óleo na polpa, que varia de 30 a 70% (base seca), rico em ácido oleico. Atualmente, é a cultura

agrícola com maior produtividade de óleo por hectare cultivado (2,00 a 4,50 t ha⁻¹) (Revello, 2014),

Adicionalmente, o efeito do manejo agrícola do sistema de ILP, com menor perturbação do solo com máquinas agrícolas, é responsável pela manutenção dos resíduos vegetais adicionados no sistema ILP. Esse sistema favorece a via de humificação e, conseqüentemente, estabilização do C no solo, com maiores estoques de C e N. Ao contrário, a PP adiciona elevada quantidade de resíduo vegetal da braquiária por superfície e subsuperfície. Isso demonstra a importância dos sistemas integrados, compostos por consórcio e/ou rotação de culturas de diferentes características químicas, na manutenção dos estoques de C e N nos solos, comparável à área de referência (MN).

Além disso o cultivo da macaúba pode ser integrado a práticas agrícolas sustentáveis, como a agrofloresta, proporcionando benefícios econômicos e ambientais, além da fixação de carbono (Finatec 2021; Moreira et al., 2020) e como alternativa para o extrativismo familiar, em detrimento da ocorrência da espécie em praticamente todas as regiões do Brasil (Colombo et al., 2018). Esse efeito do manejo do solo conservacionista particularmente acontece em áreas de PP com cultivo de Braquiária, justificando dessa forma os valores encontrados também no PP, pois trata-se de uma cultura que permite uma adição considerável de matéria orgânica ao solo, aumentando, assim, os estoques de C e N (Barbosa et al., 2022).

Os valores elevados de estoque de C e N estão sendo relacionados à formação de grande quantidade de material vegetal devido ao rápido crescimento e cobertura do solo, deposição de resíduos dos animais, conseqüentemente estimulação da biomassa microbiana e a elevada rizodeposição com um uniforme distribuição, favorecendo o aumento dos teores e estoques de C e N no solo (Sampaio et al., 2020; Bieluczyk et al., 2020).

Tabela 4. Valores de estoques de carbono no solo (Mg ha⁻¹) sob os diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).

Profundidade (cm)	MN	PP	ILP	SAF
0-10	19,98 a	11,60 a	18,40 a	11,63 b
0-30	54,81 a	42,10 b	53,04 a	31,90c
0-100	99,25 a	75,22 b	81,90 a	51,98 c

* As médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância

Tabela 5. Valores de estoques de nitrogênio no solo (Mg ha^{-1}) sob os diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).

Profundidade (cm)	MN	PP	ILP	SAF
0-10	1,34 a	1,05 a	1,33 a	0,87 b
0-30	4,28 a	4,15 a	5,08 a	2,78 b
0-100	8,46 b	9,22 a	9,70 a	4,79 c

*As médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância

3.6 Fracionamento Físico da Matéria Orgânica do Solo

3.6.1 Teores de Carbono Orgânico Particulado

A Tabela 7 apresenta os valores de carbono orgânico particulado nos diferentes sistemas de manejo do solo, até a profundidade de 30 cm. A MN apresentou um comportamento semelhante ao PP em relação à distribuição do COP no perfil do solo. Em ambos os casos, os maiores teores foram observados na camada de 5-10 cm, enquanto nas demais profundidades apresentaram menores concentrações.

Observa-se que o ILP e o SAF apresentaram o maior acúmulo de COP na camada superficial (0-5 cm), com um valor de 1,3 e 1,8 Mg ha^{-1} respectivamente, sendo justificado por apresentarem maior diversidade de plantas no sistema que contribuem para maiores entradas de C. No entanto, esses mesmos sistemas demonstraram uma redução dos teores de COP em profundidade nas 5-10 cm e 10-20 cm para o SAF, seguida de um incremento na camada mais profunda (20-30 cm), e de 5-10 cm e 20-30 cm para o ILP com um aumento na camada 10-20cm.

De acordo com Gazolla et al. (2015), os sistemas de manejo sustentáveis que contribuem para maior aporte de C e resíduos na superfície do solo aumentam os teores de COP, pois maior parte deste compartimento (COP) é formado por partículas originárias de resíduos de plantas. Isso torna essa fração mais suscetível à decomposição por microrganismos, particularmente, quando o solo é perturbado (Locatelli et al., 2022). Isso se torna mais preocupante quando o COP possui baixa recalcitrância e quando não está ocluído nos agregados do solo, o que é provável que esteja acontecendo na área de estudo. A classe textural do solo da área de estudo é franco arenosa. Nesse caso, torna-se necessário uma adição ainda maior de matéria orgânica ao solo para atuar como agente cimentante na agregação desse solo arenoso para que os resíduos orgânicos que fazem parte do COP estejam dentro dos agregados protegidos da decomposição.

Em estudo realizado no Tocantins em Neossolo Quartzarênico, Lustosa Filho et al. (2024) afirmam que o COP nos sistemas silvipastoris na camada superficial (0-5 cm) foram maiores do que aqueles em outros sistemas de uso da terra incluindo a mata nativa, não diferindo do observado nesse estudo, onde p ILP apresentou valores superiores ao PP e MN. O mesmo autor sustenta que nos sistemas silvipastoris, há uma grande quantidade de entrada de resíduos, incluindo gramíneas, espécies herbáceas e das árvores do sub-bosque, que contribuem para o aumento na entrada de C no solo, permitindo um maior estoque de C no solo.

Tabela 6. Teores de COP no solo (Mg ha^{-1}) sob os diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).

Profundidade (cm)	MN	PP	ILP	SAF
0-5	0,4 b	0,6 b	1,3 a	1,8 a
5-10	1,5 a	1,6 a	0,8 b	0,9 b
10-20	0,7 b	0,9 a	1,2 a	0,6 b
20-30	0,4 b	0,5 b	0,9 a	1,0 a

*As médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

3.6.2 Carbono Orgânico Associado aos Minerais

Os valores de COAM estão apresentados na Tabela 8, onde observa-se que, a maior entrada de COAM foi na camada superficial (0-5cm), e uma redução em profundidade no solo para todos os tratamentos avaliados.

A MN apresentou maior aporte de COAM em relação aos sistemas de manejo, apresentando um maior valor de $20,32 \text{ Mg ha}^{-1}$, na camada de 0-5 cm. Isto pode estar relacionado com o fato de tratar-se de um ambiente em equilíbrio, não antropizado e com constante deposição de resíduos vegetais, que é evidenciado com os resultados apresentar maior estabilidade da matéria orgânica, principalmente, pela interação com a fração mineral do solo. Comparando os sistemas de manejo agrícola, o sistema de ILP apresentou maiores valores de COAM em relação ao PP e SAF, que não diferiram estatisticamente, apresentando valores de $13,46$; $10,22$ e $11,12 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente na camada superficial (0-5 cm). Os valores mais baixos dos teores de COAM foram observados no sistema de manejo PP em todas as camadas analisadas, exceto na profundidade de 20-30 cm que não difere dos demais.

Segundo Cotrufo e Lavalley (2022) a formação da fração COAM favorecida por condições que aumentam a disponibilidade de substratos solúveis e por um ambiente com alta capacidade de complexação mineral, o que reduz a decomposição e promove a persistência do carbono no solo a longo prazo. Dessa forma, o COAM do ILP apresenta-se de forma mais estável em comparação com os demais manejos, desempenhando um papel essencial no sequestro de carbono e na melhoria da fertilidade e estrutura do solo, no bioma do Cerrado.

Tabela 7. Teores de COAM no solo (Mg ha^{-1}) sob os diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).

Profundidade (cm)	MN	PP	ILP	SAF
0-5	20,32 a	10,22 c	13,46 b	11,12 c
5-10	11,56 a	6,99 b	10,62 a	9,28 b
10-20	9,80 a	6,44 b	8,85 a	7,82 a
20-30	7,21 a	6,63 a	6,98 a	6,28 a

*As médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância

3.7 Estoque de COP e COAM

3.7.1 Estoque de Carbono orgânico particulado

Os resultados referentes aos estoques de COP estão apresentados na Tabela 10. A MN apresentou um aporte de COP estatisticamente inferior aos sistemas de manejo, exceto na camada 0-5 cm que foi igual ao PP. Apresentou um acréscimo no estoque de COP na camada 5-10 cm, tendo valor estatisticamente igual ao PP. O estoque de COP no sistema PP foi maior nas camadas intermediárias (5-10 e 10-20 cm) e baixos na camada superficial e na última camada em comparação com o ILP e SAF.

O sistema SAF apresentou maior aporte na camada de 0-5 cm em comparação com os outros sistemas e mata nativa, porém notou-se uma redução nas camadas mais profundas. O ILP apresentou valores baixos de estoque do COP nos primeiros 10 cm e maiores valores nas profundidades de 10-20 e 20-30 cm.

As mudanças na fração COP podem ser atribuídas a sua composição predominante, ou seja, relativamente aos fragmentos não decompostos e à falta de associação com minerais do solo (areia $>53 \mu\text{m}$). Isso torna essa fração mais suscetível à decomposição por microrganismos, particularmente quando o solo é perturbado (Cotrufo et al., 2015; Locatelli et al., 2022).

Tabela 8. Estoque de COP no solo (Mg ha^{-1}) sob os diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).

Profundidade (cm)	MN	PP	ILP	SAF
0-5	0,26 c	0,42 c	0,89 b	1,34 a
5-10	0,93 a	1,18 a	0,58 b	0,67 b
10-20	0,90 b	1,26 a	1,70 a	1,01 b
20-30	0,59 b	0,53 b	0,94 a	0,89 a

* As médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância

3.7.2 Estoque de Carbono orgânico associado aos minerais

Na Tabela 11 estão apresentados os valores dos estoques de COAM sob diferentes manejos e mata nativa em todas as profundidades avaliadas. A MN apresentou valores elevados de estoque de COAM em todas as profundidades avaliadas, não diferindo do ILP na profundidade de 0-20 cm e nem do SAF na profundidade de 5-20 cm. Esse maior aporte na MN é justificado pela falta de perturbação na mata permitindo que o carbono esteja mais estável, e por se tratar de uma fração associada a partículas minerais do solo.

O sistema ILP apresentou maior aporte de estoque de COAM na camada superficial com $9,35 \text{ Mg ha}^{-1}$ em relação aos demais sistemas de manejo. Nas camadas de 5-10 e 10-20 cm este sistema foi estatisticamente igual ao SAF, com maiores valores em relação ao PP. Em contrapartida o PP apresentou menores valores de estoque em todas as profundidades avaliadas, exceto na 0-5 cm que foi igual ao SAF e na de 20-30 cm que foi estatisticamente igual ao ILP e superior ao SAF.

A redução do impacto causado por sistemas agrícolas está relacionada com adsorção de compostos orgânicos na matriz mineral do solo e, conseqüentemente maior COAM (Lavalley et al., 2020). A manutenção dos estoques totais de C e a redução na fração de estoque de COAM indicam que, apesar dos resíduos estarem a ser produzidos de forma suficiente, o C acumulado não está sendo transferido/estabilizado na fração COAM, na mesma proporção em que a taxa de mineralização dessa fração está ocorrendo, isso foi evidenciado no sistema de manejo PP. O sistema de manejo ILP demonstrou maior estabilização do C na fração mineral, pois de acordo com Contrufó et al. (2015), isso depende fortemente da qualidade do material orgânico.

Tabela 9. Estoque de COAM no solo (Mg ha^{-1}) sob os diferentes sistemas de manejo agrícola e mata nativa, em João Pinheiro (MG).

Profundidade (cm)	MN	PP	ILP	SAF
0-5	11,68 a	7,05 b	9,35 a	8,12 b
5-10	7,11 a	5,20 b	7,54 a	7,01 a
10-20	13,23 a	9,40 b	13,10 a	12,20 a
20-30	10,17 a	7,00 b	7,44 b	5,69 c

*As médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância

4. CONCLUSÃO

Os maiores valores de densidade do solo foram observados no sistema de manejo SAF em comparação aos sistemas PP, ILP e a área de referência sob vegetação de MN.

Os teores de carbono foram significativamente mais elevados na MN em todas as profundidades analisadas, enquanto o sistema ILP apresentou os maiores valores entre os sistemas manejados, principalmente nas camadas superficiais. Os teores de nitrogênio seguiram um padrão semelhante ao do carbono, com os maiores valores registrados na MN e no sistema ILP, especialmente nas camadas mais superficiais.

Os estoques de carbono foram mais elevados na MN, com o sistema ILP demonstrando maior capacidade de retenção de carbono entre os sistemas de manejo agrícola, nas camadas de 0-30 e 0-100 cm. Os estoques de nitrogênio também foram mais elevados na Mata Nativa (0-10 e 0-30 cm). Os sistemas PP e ILP maiores estoques de N em todas as camadas avaliadas. Na camada de 0-100 cm, esses sistemas também apresentaram maiores estoques de N em comparação à área de referência (MN).

O aporte de COP foi maior na camada superficial do SAF e do ILP, indicando maior aporte de material orgânico fresco. A Mata Nativa manteve valores estáveis ao longo do perfil, enquanto o PP apresentou os menores valores em profundidade. O teor de COAM foi mais elevado na Mata Nativa em todas as profundidades, reforçando sua estabilidade e capacidade de retenção de carbono em longo prazo. O sistema ILP destacou-se entre os sistemas de manejo, evidenciando seu potencial para aumentar os estoques de carbono estável no solo. A mata nativa apresentou valores reduzidos de estoque de COP em relação os sistemas de manejo.

Para o estoque de COAM, a MN apresentou maiores valores em relação aos manejos sustentáveis avaliados. Esse resultado mostra a importância da mata nativa na estabilização do carbono no solo. Ao observar os sistemas de manejo do solo, a ILP apresenta maiores estoques de COAM em todas as profundidades avaliadas.

Conclui-se que o sistema ILP é uma estratégia eficiente para o acúmulo e estabilização de C e N no solo. Cabe ressaltar que a pesquisa não está recomendando a retirada da MN de Cerrado para o uso agropecuário, mas uma vez que houve a mudança no uso da terra, a produção agropecuária utilizando práticas de manejo sustentáveis, como ILP e PP, são as mais indicadas para a condição do Cerrado brasileiro.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvares, C. A., Stape, J. J., Sentelhas, P. C., Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.?, p.711-728. 2013 <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Arnold, S. L., & Schepers, J. S. A Simple Roller-Mill Grinding Procedure for Plant and Soil Samples. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.35, p.537–545, 2004. <http://dx.doi.org/10.1081/CSS-120029730>
- Barbosa, L. R.; Souza, H. A.; Teixeira, N. M. L.; Leite, L. F. C. Organic matter compartments in an Ultisol under integrated agricultural and livestock production systems in the Cerrado. **Ciência Rural**, v. 52, p. 20200845, 23 mar. 2022. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200845>
- Bieluczyk, W., Piccolo, M. C., Pereira, M. G., Moraes, M. T., Soltangheisi, A., Bernardi, A. C. C., Pezzopane, J. R. M., Oliveira, P. P. A., Moreira, M. Z., Camargo, P. B., Dias, C. T. S., Batista, I., Cherubin, M. R. Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. **Geoderma**, v.371, n.6, p.114368,2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114368>
- Cambardella, C.A., Elliott, E.T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 56, 777–783. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>
- Costa, A. A.; Luduvico, G.A.; Macedo, I.L.M. Atributos físicos e estoque de carbono em áreas sob diferentes formas de uso do solo no Cerrado do Oeste da Bahia / Physical attributes and carbon stock in areas under different forms of use in Cerrado soil of west of Bahia. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 32294–32306, 29 maio 2020.<https://doi.org/10.34117/bjdv6n5-612>
- Cotrufo, M.F., Soong, J.L., Horton, A.J., Campbell, E.E., Haddix, M.L., Wall, D.H., Parton, W.J., 2015. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. **Nat. Geosci.** 8, 776–779.<https://doi.org/10.1038/ngeo2520>
- Cotrufo, M. F.; Lavelle, J. M. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. Em: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Elsevier, 2022. v. 172p. 1–66.
- Dos Santos S. D.; Ramos, M. L.; Marchão, R. L.; Maciel, G. A.; de Oliveira, A. D.; Malaquias, J.V.; de Carvalho, A. M. How diversity of crop residues in long-term

- no-tillage systems affect chemical and microbiological soil properties. **Soil and Tillage Research**, v. 194, p. 104316, 1 nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104316>
- EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, v. 997, p. 65 – 67. 2017.
- Duarte, C. S.; Oliveira, J. C.; Freitas, I. C.; Silva, K. T.; Matrangolo, W. J. R.; Lana, A. M. Q.; Frazão, L. A. Estoques de carbono e nitrogênio do solo em um sistema integrado de produção com *Cratylia argentea* no Cerrado brasileiro. 2023. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1158286>
- FAO. **A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes –GSOC-MRV Protocol**. Rome. 2020, p. 5-20. 2020 <https://doi.org/10.4060/cb0509en>.
- Ferreira, C. R.; Guedes, J. N.; Rosset, J. S.; Anjos, L. H. C.; Pereira, M. G. Diversity of the edaphic macrofauna in areas managed under no-tillage for different periods. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 40, n. 2, p. 599-610, 2019. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n2p599>
- Filho, J. F. L.; de Oliveira, H.M.M.R.; de Sousa, V.M.; dos Santos, A.C.; de Oliveira, T.S. 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, 2024.
- Finattec (2021). Projeto recuperação e proteção dos serviços relacionados ao clima e à biodiversidade no corredor sudeste da mata atlântica do Brasil. Seleção pública PSA no 002/2021. Disponível em: https://www.finattec.org.br/site/wpcontent/uploads/2021/05/edital_PSA_002_2021_edita1.pdf
- Freitas, I.C., Ribeiro, J.M., Araújo, N.C.A., Santos, M.V., Sampaio, R.A., Fernandes, L.A., Azevedo, A.M., Feigl, B.J., Cerri, C.E.P., Frazão, L.A. Agrosilvopastoral Systems and Well-Managed Pastures Increase Soil Carbon Stocks in the Brazilian Cerrado. *Rangel Ecol Manag* 73, 776-785. 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy12122926>
- Gazolla, P. R. et al. Fractions of soil organic matter under pasture, no-tillage system and crop-livestock integration. **Semina: Agricultural Sciences**, v.36, n.2, p.693-704, 2015. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2015v36n2p693>.

- Guareschi, R. F.; Pereira, M. G.; Perin, A. Estoque de carbono em latossolo vermelho distroférico sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**, v.7, n. 4, p. 597-602, 2012. <https://doi.org/10.5039/agraria.v7i4a1767>
- Karhu, K., Hiltunen, E., Järvenpää, M., Arppe, L., Christensen, B.T., Fritze, H., Kulmala, L., Oinonen, M., Pitkanen, J.-M., Vanhala, P., Heinonsalo, J., Liski, J., 2019. Similar temperature sensitivity of soil mineral-associated organic carbon regardless of age. **Soil Biol. Biochem.** 136, 107527 <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107527>.
- Khorramdel, S.; Koocheki, A.; Mahallati, M.N.; Khorasani, R.; Ghorbani, R. Evaluation of carbon sequestration potential in corn fields with different **management systems**. **Soil & Tillage Research**, v.133, p.25-31, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.04.008>
- Lammel, D.R.; Butterbach-Bahl, J.; Cerri, C.E.P.; Louis, S.; Schnitzler, J.P.; Feigl, B.J.; Cerri, C.C. and N stocks are not impacted by land use change from Brazilian Savanna (Cerrado) to agriculture despite changes in soil fertility and microbial abundances. **J. Plant Nutr. Soil Sci**, v. 180, p. 436–445, 2017. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600614>
- Lavallee, J.M., Soong, J.L., Cotrufo, M.F., 2020. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Glob. Chang. Biol.** 26, 261–273. <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>.
- Leite, L. F. C.; Arruda, F. P. De.; Costa, C. Do. N.; Ferreira, J.Da. S.; Neto, M. R. H. Qualidade química do solo e dinâmica de carbono sob monocultivo e consórcio de macaúba e pastagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1257–1263, dez. 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001200002>
- Locatelli, J. L.; Santos, J. L.; Cherubin, M. R.; Cerri, C. E. P. Changes in soil organic matter fractions induced by cropland and pasture expansion in Brazil's new agricultural frontier. **Geoderma Regional**, v. 28, p. e00474, mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00474>
- Lopes, R. S. Caracterização Da Composição Química Da Polpa De Frutos De *Acrocomia* De Três Populações De Interesse Econômico Visando Aplicação Industrial. 2024 [s.d.].

- Machado, L. V.; Rangel, O. J. P.; Mendonça, E. S.; Machado, R. V.; Ferrari, J. L. Fertilidade e compartimentos da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 3, p. 289-299, 2014.
- Nelson D. W., & Sommers L. E. Methods of soil analysis part 3 chemical methods. Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, Inc. **American Society of Agronomy**, Inc. Madison, Wisconsin, USA, 1996.
- Parreiras, T. C.; Bolfe, É. L. Expansão E Intensificação Da Agropecuária No Cerrado. 2022.
- Pegoraro, R. F, Moreira, C. G, Dias, D. G, Silveira, T. C. Carbon and nitrogen stocks in the soil and humic substances of agricultural crops in the semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica**, v.49, n.4, p.574-583, 2018. <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20180065>
- Polizel, S.P., Vieira, R.M.S.P., Pompeu, J., Ferreira, Y.C., Sousa-Neto, E.R., Barbosa, A.A., Ometto, J.P.H.B., 2021. Analyzing the dynamics of land use in the context of current conservation policies and land tenure in the Cerrado – MATOPIBA region (Brazil). *Land Use Policy* 109, 105713. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105713>.
- Sabino, B. T. S.; Oliveira, F. P.; Silva, P. L. F.; Nóbrega, C. C.; Dias, B. De. O.; Campos, M. C. C. Qualidade de solo aos oito anos de condução sob sistemas integrados de produção agropecuária. **Revista Valore**, v. 8, p. 144–155, 27 maio 2023. <https://doi.org/10.22408/rev8020231466144-155>
- Sales, A.; Silva, A. R.; Veloso, C. A. C.; Carvalho, E. J. M.; Miranda, B. M. Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na Amazônia Legal. *Colloquium Agrariae*, v. 14, n. 1, p. 1-15, 2018. <https://journal.unoeste.br/index.php/ca/article/view/1989>
- Sampaio, A. C. F.; Silva, E. S.; Vale Júnior, J. F.; Silva, E. E.; Santos, B. R., & Oliveira, R. F. (2020). Granulometry and carbon and nitrogen contents at different depths of a soil under integrated production systems. **Agropecuária Científica no Semiárido**, 16(2), 58-63. <https://doi.org/10.30969/acsa.v16i2.1083>
- Sisti, C. P. J.; Santos, H. P.; Kohhann, R.; Alves, B. J. R.; Urquiaga, S.; Boddey, R.M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, v. 76, p. 39-58, 2004.

- Smith, J. L.; Myung, M. H. Rapid procedures for preparing soil KCl extracts for 15N analysis. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, Boca Raton, v. 21, p. 2173-2180, 1990.
- Soares, D. Dos S.; Ramos, M. L. G.; Marchão, R. L.; Maciel, G. A.; Oliveira, A. D.; Malaquias, J. V.; Carvalho, A.M. How diversity of crop residues in longterm no-tillage systems affect chemical and microbiological soil properties. **Soil & Tillage Research**, v.194, n.104316, p.1-12, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104316>
- Sousa, H. M.; Correia, A. R.; Silva, B.M.; Oliveira, S.S.; Campos, D. T. Dos S.; Wruck, F.J. Dynamics of soil microbiological attributes in integrated crop-livestock systems in the cerrado amazonônia ecotone. **Revista Caatinga**, v.33, n.1, p.09-20, 2020.
<https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n102rc>
- Parreiras, T. C.; Bolfe, É. L. Expansão E Intensificação Da Agropecuária No Cerrado. 2022.
- Polizel, S.P., Vieira, R.M.S.P., Pompeu, J., Ferreira, Y.C., Sousa-Neto, E.R., Barbosa, A.A., Ometto, J.P.H.B., 2021. Analyzing the dynamics of land use in the context of current conservation policies and land tenure in the Cerrado – MATOPIBA region (Brazil). **Land Use Policy** 109, 105713.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105713>.

CAPÍTULO II: META-ANÁLISE: UMA REVISÃO MÉTRICA SOBRE A INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE MANEJO AGRÍCOLA E COBERTURA VEGETAL NOS ESTOQUE DE CARBONO, NITROGÊNIO E DAS FRAÇÕES GRANULOMETRICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA EM SOLOS DO CERRADO

RESUMO

A conversão da vegetação nativa em sistemas agropecuários tem impactado na dinâmica do carbono e do nitrogênio no solo. O objetivo do estudo é realizar uma revisão sistemática para avaliar a influência dos sistemas de manejo agropecuários sustentáveis e cobertura vegetal de mata nos estoques de C e N total e nas frações granulométricas da matéria orgânica do solo do Cerrado brasileiro. Foi realizada uma revisão sistemática para a obtenção de publicações obedecendo a uma série de critérios e filtros empregados. Com base no conjunto de dados compilados, foi realizada uma meta-análise para os estoques de carbono, nitrogênio, carbono orgânico particulado e carbono orgânico associado aos minerais, utilizando o R. Foram utilizados ao todo 10 publicações que atendiam aos critérios estabelecidos, gerando um total de 37 comparações pareadas. Os resultados obtidos mostram que os estoques de C e N são influenciados pelas classes de solos, por exemplo, os Latossolos Amarelos apresentaram uma redução significativa no estoque de C de 25,24% ($p \leq 0,001$), enquanto os Argissolos Amarelos registraram aumento de 17,24% ($p \leq 0,035$). O estoque de N aumentou significativamente nos Latossolos Vermelhos em 33,21% ($p \leq 0,04$), evidenciando sua capacidade de retenção devido aos elevados teores de óxidos de ferro. Em relação à profundidade, o COP apresentou redução significativa de 29,99% ($p \leq 0,008$) abaixo de 50 cm, demonstrando sua sensibilidade às mudanças no uso da terra. Ao contrário do que é sedimentado na literatura, os solos arenosos registraram aumento significativo no estoque de C de 21,23% ($p \leq 0,03$). O tempo de conversão também influenciou os estoques, com aumentos nos primeiros anos (1,96% de C e 19,57% de N) e redução expressiva no período de 21-30 anos, quando os estoques de C e COP diminuíram 21,56% e 26,87%, respectivamente. O sistema de manejo foi um fator determinante para os estoques de C e N, com o cultivo convencional causando reduções de C (23,38%) e N (28,49%), enquanto a integração lavoura-pecuária promoveu aumentos, porém, não significativos em C (23,12%) e COP (10,77%), além do aumento significativo de N (16,41%). Os resultados demonstram a necessidade de adoção de práticas conservacionistas, como plantio direto e sistemas integrados, para minimizar as perdas de matéria orgânica e garantir a sustentabilidade dos solos do Cerrado.

Palavras-chaves: Matéria orgânica do solo, Estabilização do carbono, análise de efeitos combinados.

ABSTRACT

The conversion of native vegetation into agricultural and livestock systems has impacted the dynamics of carbon and nitrogen in the soil. The aim of this study is to conduct a systematic review to evaluate the influence of sustainable agricultural management systems and forest cover on the stocks of total C and N, as well as on the granulometric fractions of soil organic matter in the Brazilian Cerrado. A systematic review was performed to gather publications following a set of criteria and filters. Based on the compiled data set, a meta-analysis was conducted on the stocks of carbon, nitrogen, particulate organic carbon, and mineral-associated organic carbon, using R. A total of 10 publications meeting the established criteria were used, resulting in 37 paired comparisons. The results show that C and N stocks are influenced by soil classes; for example, Yellow Latossols exhibited a significant reduction in C stock of 25.24% ($p \leq 0.001$), whereas Yellow Argissols showed an increase of 17.24% ($p \leq 0.035$). N stock increased significantly in Red Latossols by 33.21% ($p \leq 0.04$), demonstrating their retention capacity due to high iron oxide content. Regarding depth, soil organic carbon (SOC) showed a significant reduction of 29.99% ($p \leq 0.008$) below 50 cm, indicating its sensitivity to land-use changes. Contrary to what is typically reported in the literature, sandy soils showed a significant increase in C stock of 21.23% ($p \leq 0.03$). The conversion timeframe also influenced the stocks, with increases in the first years (1.96% C and 19.57% N) and a significant decrease during the 21–30-year period, when C and SOC stocks decreased by 21.56% and 26.87%, respectively. Management system was a key factor affecting C and N stocks; conventional cultivation caused reductions of 23.38% in C and 28.49% in N, whereas integrated crop-livestock systems promoted increases though not statistically significant in C (23.12%) and SOC (10.77%), along with a significant increase in N (16.41%). The results highlight the need to adopt conservation practices, such as no-till farming and integrated systems, to minimize organic matter losses and ensure the sustainability of Cerrado soils.

Keywords: Soil organic matter, Carbon stabilization, Combined effect analysis.

1. INTRODUÇÃO

Os solos tem a capacidade de atuar como reservatório de carbono (C) entre os ecossistemas terrestres (~3600 Pg a 2 metros de profundidade), armazenando C mais que a atmosfera e a vegetação juntas, sendo no contexto global, essencial para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e adaptar os sistemas agrícolas às mudanças climáticas, por meio da estabilização e proteção do carbono no solo (IPCC, 2021; Locatelli et.al.,2023).

A mudança no uso da terra e a má gestão são considerados os principais fatores associados à perda de C no solo, e o aumento das emissões brutas do GEE em todo o mundo (SEEG, 2024). No Brasil, a mudança do uso de terra, representa mais de 50% das emissões totais de CO₂eq, principalmente associada à remoção da vegetação nativa para expansão das atividades agropecuárias (Albuquerque et al., 2020; SEEG,2024), como observado no bioma do Cerrado.

Na região do Cerrado cerca de 78,2% das áreas de pastagem apresentam degradação física em nível intermediário ou severo (MapBiomas, 2020), o que contribui para a redução da fertilidade do solo e afeta negativamente a disponibilidade de água e nutrientes, a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS), as trocas de gases do efeito estufa (GEE) com a atmosfera e a atividade microbiana (Sousa et al., 2024).

A adoção de sistemas conservacionistas tem sido amplamente estudada como estratégia para melhorar a qualidade dos solos e mitigar a emissão de GEE (Sousa et al., 2024). Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2020), a expansão de práticas agrícolas sustentáveis pode reduzir em até 30% as emissões de GEE provenientes da agricultura e melhorar a produtividade dos solos a longo prazo.

Apesar de existirem vários estudos publicados sobre a adoção de sistemas conservacionistas para estoque de carbono, devido à complexidade dos fatores responsáveis pela estabilização de carbono, ainda existem lacunas que precisam ser esclarecidas

Dadas essas informações, levantou-se a hipótese de que a introdução de sistemas de manejo sustentáveis pode aumentar os estoques de C e N, bem como das frações granulométricas da matéria orgânica do solo ao longo do tempo no bioma Cerrado.

Sendo assim, com base no conjunto de dados compilados a partir de estudos publicados, o objetivo com este estudo foi realizar uma meta-análise para avaliar quantitativamente a influência dos sistemas de manejo agropecuários sustentáveis e cobertura vegetal nos estoques de C e N total nos solos do Cerrado brasileiro. Adicionalmente, analisar os diferentes compartimentos do carbono no solo, o carbono orgânico particulado (COP) e o carbono orgânico associado aos minerais (COAM).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização da Área de Estudo

O estudo foi realizado no bioma Cerrado, conhecido como a savana brasileira, que possui área de 2.036.448 km² de extensão no Brasil. É caracterizado por ser o único bioma da América do Sul a limitar-se com vários biomas, sendo ao norte com a Amazônia, ao nordeste e a leste com a Caatinga, a sudeste com a Mata Atlântica e o Sudoeste com Pantanal (IBGE, 2024). A área abrangida pelo bioma Cerrado é de clima tropical sazonal, com duas estações bem-definidas: verões chuvosos e invernos secos. A temperatura média varia entre 22 e 27 °C, variando ao longo dos períodos. A precipitação média anual é de aproximadamente 1500 mm. Os solos predominantes no Cerrado são caracterizados por serem antigos, profundos, bem drenados, com baixa fertilidade natural e acidez acentuada (Balbino, et al. 2011; Costa, et al. 2020).

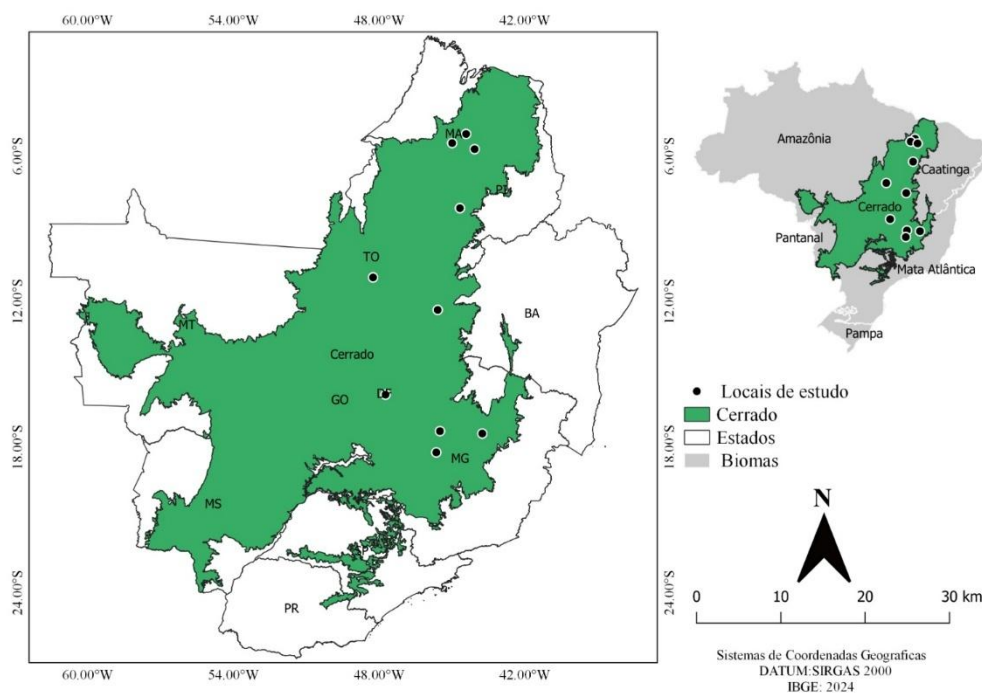


Figura 1. Localização da área de estudo o Cerrado Brasileiro.

2.2 Compilação de dados

A meta-análise foi feita baseada em uma revisão sistemática de estudos da literatura científica sobre o efeito dos sistemas de manejo agrícola sustentáveis e cobertura vegetal nos estoques de carbono e nitrogênio nos solos e nos compartimentos da MOS no bioma do Cerrado. Os bancos de dados empregados para a pesquisa dos artigos foram: *Web of*

Science, Periódicos CAPES, *SCOPUS*, *Scienc direct* e *Scielo* onde foram usados para pesquisar artigos recentes publicados nos últimos 10 anos, ou seja, a partir do ano de 2014. As palavras-chave usadas na pesquisa bibliográfica incluíram: “estoques de carbono”, “estoques de nitrogênio”, “pastagens”, “integração lavoura-pecuária”, “sistema agroflorestal”, “matéria orgânica do solo”, “carbono orgânico particulado”, “carbono orgânico associado aos minerais” e “Cerrado brasileiro”.

O artigo deve atender aos seguintes critérios para ser incluído na meta-análise: (1) os estudos devem ter o histórico da conversão da área do sistema de manejo empregado para que se conheça o período em que o mesmo foi implementado; (2) o estoque de C, estoque de N avaliados, no mínimo, até a camada 0–30 cm de profundidade, de acordo com o recomendado pela FAO (2020). (3) os estudos deveriam apresentar dados de carbono e nitrogênio em Mg ha^{-1} ou em kg m^{-3} ; (4) os estudos devem ter extraído carbono orgânico particulado (COP) e matéria orgânica associada aos minerais (COAM), utilizando a metodologia de Cambardella e Elliot (1992).

2.3 Organização dos dados obtidos

A busca de dados publicados com base nas palavras-chaves empregadas resultou em 1629 artigos, onde foi feita a seleção e exclusão dos artigos duplicados, resumos expandidos e artigos de revisão sistemática, tendo 1404 artigos, dos quais, um total de 110 publicações foram lidas e revisadas baseando-se nos critérios empregados. Na sequência, apenas 10 publicações atenderam a todos os critérios e foram selecionados para a fase de análise, pois essas publicações usaram a metodologia de Cambardella e Elliot (1992) e seguiram às recomendações da FAO (2020) (Figura 2). Essas 10 publicações estão distribuídas em seis municípios (Figura 1) dos estados de Bahia, Minas Gerais, Maranhão, Piauí, Tocantins e Brasília, oito publicações continham dados de estoque de nitrogênio, três continham dados de estoque de COP e COAM (Tabela 1).

Um dos grandes desafios enfrentados na busca de publicações, que de certa forma, contribuiu para a redução do número de estudos foi a metodologia aplicada pelos autores, em que a maior parte dos estudos avaliaram apenas os estoques de carbono e nitrogênio até 20 cm de profundidade, limitando dessa forma, informações de C nas camadas mais profundas. Por outro lado, seis estudos avaliaram o comportamento de C até uma profundidade de 100 cm como uma abordagem mais abrangente para contabilizar as mudanças no estoque de COS nos solos profundamente intemperados do Brasil (IPCC, 2019; FAO, 2020; Oliveira et al., 2022). Para os artigos que as informações dos estoques

estavam representadas graficamente, optou-se por entrar em contato com os autores via *e-mail*, pedindo dos dados em forma de Tabela. Em caso da falta de colaboração dos autores desses artigos, usou-se o *Web plot digitalizer.automeris.io* versão 5.2 para extração dos dados.

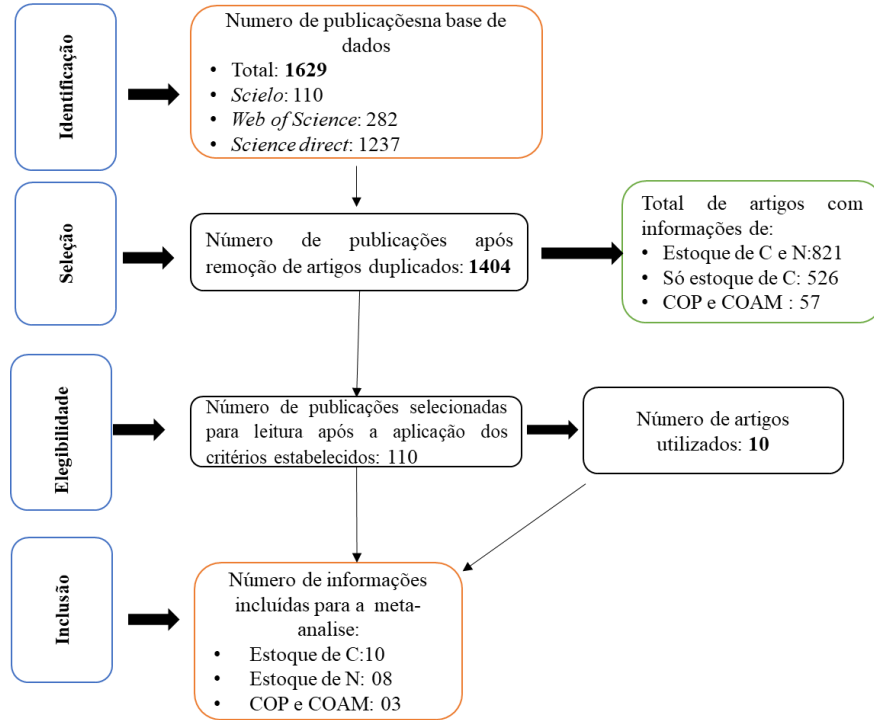


Figura 2. Fluxograma realizado para a execução da meta-análise

2.4 Meta-análise

Foram compilados dados de mata nativa e sistemas de manejos, onde foram comparados os estoques de carbono, nitrogênio, COP e COAM, considerando a profundidade do solo, tipo e textura do solo, período de conversão e o tipo de manejo para realização da meta-análise comparando os resultados entre os estudos. De modo geral, buscou-se identificar o ganho ou perda no estoque de carbono após a conversão da mata nativa. Para tal, foi utilizado um modelo aleatório e ponderado de variância inversa Ln (RR) (Viechtbauer, 2010). Para cada estimativa, assume-se que corresponde ao tamanho do efeito (verdadeiro), com $i = 1, 2, 3, \dots, k$ estimativas independentes do tamanho do efeito, obtidas por meio da Equação (1):

$$Y_i = \theta_i + e_i \quad (1)$$

Onde: Y_i é o efeito observado num determinado estudo i , θ_i é o verdadeiro efeito desconhecido do estudo i , e_i é o erro amostral associado ao estudo i .

Ademais, foi determinado o tamanho do efeito, como a razão entre os estoques médios de C e N antes e depois da mudança no uso da terra Equação (2).

$$Ln(RR) = Ln \frac{\bar{X}_v}{\bar{X}_a} = Ln(\bar{X}_v) - Ln(\bar{X}_a) \quad (2)$$

Onde: X_v e X_a representam a média do estoque de carbono orgânico antes e depois da mudança no uso da terra.

Em conjunto de estimativas de efeito, é comum empregar a média ou outra medida de tendência central. Entretanto, a confiabilidade dessas estimativas pode diferir entre os experimentos. A precisão da análise global melhora ao atribuir pesos às estimativas individuais com base em sua exatidão estatística, considerando menores erros padrão (Hedges et al., 1999). Desta forma, a meta-análise frequentemente recorre ao uso de uma média ponderada Equação (3).

$$Ln(RRw) = \sum_{i=1}^n \frac{w_i \times Ln(RRi)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

Onde: n representa o número de experimentos dentro de um grupo de fatores e w_i é o fator de ponderação do estudo i no grupo de fatores.

Na sequência, para realizar o cálculo do w_i , foi utilizado a Equação (4):

$$w_i = \frac{1}{v_i} \quad (4)$$

Onde: v_i representa a variação do estudo i dentro de um grupo de fatores.

A variação do i foi calculada usando a Equação (5):

$$v_i = v_w + T^2 ; e v_w = \frac{Sv^2}{nvX_v^2} + \frac{S_a^2}{naX_a^2} \quad (5)$$

Onde: v_w representa a variância dentro do estudo i ;

T^2 é a variância entre os estudos, determinado baseando-se metodologia de Borenstein et al. (2010);

nv é o tamanho da amostra antes da mudança do uso da terra;

na é o tamanho da amostra depois do uso da terra

S_v e S_a representam os desvios padrão antes e depois do uso da terra para cada par de comparação (i);

Após o cálculo da variação, determinou-se o erro padrão do $\ln(RRw)$, através de seguinte equação (6), e estabeleceu-se um intervalo de confiança de 95% para $\ln(RRw)$ obtido através da equação 7.

$$\ln(RRw)_{se} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n w_i}} \quad (6)$$

$$CI_{95\%} = \ln(RRw) \pm 1,96_s(\ln(RRw)) \quad (7)$$

Para facilitar a interpretação dos resultados obtidos do $\ln(RRw)$, utilizou-se a equação 8 para transformar os dados em percentagem, através do Effect size (%).

$$Effectsize(\%) = (\exp(\ln(RRw)) - 1)100\% \quad (8)$$

Para executar a meta-análise, utilizado o software R versão 4.2.0 e os pacotes “*meta*” e “*metafor*” (R Core Team, 2022). Inicialmente gerou-se um modelo geral usando todo o conjunto de dados ($n = 37$) para antes e depois das mudanças de uso da terra e foi testada a significância do grupo de fatores usando um modelo aleatório.

Tabela 1. Os dez (10) artigos científicos utilizados para a realização da meta-análise.

Estudo	Localização	Conversão da área	Classe de solo	Textura	Profundidade (cm)	Período (anos)	Estoque de C	Estoque de N (Mg ha ⁻¹)	COP	COAM
Barbosa et al. (2022)	Maranhão	Mata Nativa	Latossolo	Média	0-50	0-20	93,3	5,01	1,79	95,02
		PD	Vermelho-				98	3,8	2,03	104,82
		ILP	Amarelo				107,8	5,8	2,19	111,53
		ILP	Distrófico coeso				121	6,3	1,48	126,72
		ILP					112,3	4,9	1,6	114,4
Locatelli et al. (2022)	Maranhão	Mata Nativa	Latossolo	Argilosa	>50	0-30	117,41	4,01	15,67	117,04
		PA	Vermelho				98,3	3,64	11,46	87,53
		ILP	Amarelo Distrófico				120,55	3,77	18,2	101,37
Filho et al. (2024)	Tocantis	Mata Nativa	Neossolo Quartzarênico	Arenosa	>50	0-20	44,13	3,27	2,5	2,06
		PA					45,53	3,15	2,95	2,02
		PA					62,39	4,24	1,46	2,85
		ILPF					54,52	3,77	1,11	2,35
		ILPF					48,75	3,3	1,07	2,11
		ILPF					57,88	4,1	1,61	2,56
Vogado et al. (2024)	Maranhão	Mata Nativa	Latossolo Vermelho	Argilosa	0-50	0-20	60,63	4,61	-	-
		ILPF					67,51	4,79		
		ILP					112,53	6,7		
		ILP					127,27	6,64		
		PA					101,62	6,69		
Sousa et al. (2024)	Minas Gerais	Mata Nativa	Cambissolo Distrófico	Argilo-arenosa	0-30	0-30	113,7	-	-	-
		ILP					69,6			
		ILPF					64,5			
		CT					98,7			
Costa et al. (2020)	Bahia	Mata Nativa	Latossolo	Argilosa	>50	0-20	62,75	9,25	-	-
		CT					44,92	2,98		
		PA					51,98	3,67		
		PD					52,99	5,42		
		ILPF					60,77	7,5		
Figuereado et. al. (2020)	Minas Gerais	Mata Nativa	Latossolo	Argilosa	>50	0-30	201,11	11,13	-	-
		CT	Vermelho-				174,35	11,12		
		CT	Amarelo				183,8	10,32		

		CT					140,01	8,97		
Figueredo et. al. (2018)	Brasília	Mata Nativa					94,5	28,6		
		PD	Latossolo	Argilo-			87,4	31		
		PD	Vermelho	arenosa	>50	>10	89,6	26,7		
		CT					79,9	25,1		
Gmach et al. (2018)	Piauí	Mata Nativa					153,99			
		PD					98,37			
		PD					122,59			
		PA	Latossolo	Muito	0-50	0-10	119,91	-	-	-
		PA	Amarelo	argilosa			124,93			
		ILPF					111,95			
Silva et al. (2024)	Minas Gerais	ILPF					114,9			
		Mata Nativa					84,8			
		ILPF	Latossolo	Média	>50	0-40	106,9	-	-	-
		PA	Vermelho				129,5			
		PA					63,4			

*ILP-integração-lavoura pecuária; ILPF-integração-lavoura-pecuária-floresta; PA-pastagem; PD- plantio direto; CT- plantio convencional

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado para todo o conjunto de dado analisado, sugere grande variação entre os estudos, indicando que os diferentes fatores avaliados (classe e textura de solo, profundidade avaliada, período da conversão e manejo agrícola) podem ter influenciado nos resultados. A seguir, serão apresentados os resultados sobre a influência desses fatores nos estoques de C, N, COP e COAM nos solos do Cerrado brasileiro.

3.1 Influência da Classe e Textura do Solo, Profundidade Avaliada, Período da Conversão e Manejo Agrícola nos Estoques de C

A substituição da vegetação nativa por sistemas agrícolas exerce influência significativa sobre os estoques de carbono com variações marcantes entre as diferentes classes, textura, uso e profundidade de solo, bem como o período de implementação do sistema de manejo (Figura 3).

Ao contrário do que é observado na literatura, os solos de textura arenosa apresentaram aumento significativo de 21,23% nos estoques de C ($p \leq 0,05$), sugerindo que, sob determinadas condições de uso e manejo agrícola, esses solos podem favorecer a estabilização do carbono. Esse comportamento pode estar associado a alterações no aporte de matéria orgânica ou na mudança dos processos de decomposição. Resultado semelhante foi observado por Xavier et al. (2023), onde observaram que os solos de textura arenosa não causaram alterações nos estoques de carbono até 1 metro de profundidade. Também não esperado foram os solos de textura argilo-arenosa e muito argilosa exibirem reduções significativas de 24,02% e 4,46%, respectivamente.

Olhando para o uso do solo, o sistema de cultivo convencional (CT) apresentou redução significativa nos estoques de C, com decréscimos de 23,38%. Esses resultados indicam que o cultivo convencional, caracterizado por intensa mecanização do solo e, favorece a oxidação do carbono, principalmente por processos de mineralização e erosão (Costa et al., 2020).

No sistema de plantio direto (NT), observou-se redução não significativa nos estoques de C (11,06%). O sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) demonstrou aumento não significativo para os estoques de C (23,12%). Na pastagem (PA), verificou-se aumento não significativo do estoque de C (1,42%). No sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), observou-se decréscimo não significativa no estoque de C

(2,43%). Esses resultados sugerem que a implementação de sistemas de manejo como o ILP pode mitigar as perdas de N no solo. Esses resultados indicam que os sistemas de manejo que prezam pela diversificação do uso do solo e a presença de cobertura vegetal contínua podem contribuir para a manutenção e recuperação da fertilidade do solo, reduzindo a degradação e promovendo o sequestro de carbono (Vogado et al., 2024; Locatelli et al., 2024).

O estoque de carbono apresentou aumento significativo no período de 1–10 anos (1,96%), e uma redução significativa no período de 21–30 anos (21,56%). De acordo com Liu et al. (2021) os ganhos de carbono no solo com o tempo podem ser seguidos por uma estabilização ou até declínio se práticas inadequadas forem retomadas, e o observado nesse estudo é que há um incremento nos estoques de C e N no solo do Cerrado tanto nos sistemas de manejo com até 20 anos quanto naqueles com mais de 30 anos de implementação. Os estoques de carbono foram diretamente influenciados pela classe de solo. Nos Latossolos Vermelho Amarelo e Latossolos Amarelos, constatou-se uma redução significativa de 17,95 % e 25,24% ($p \leq 0,05$) respectivamente, indicando a susceptibilidade desses solos à depleção de carbono após a conversão da vegetação nativa para agricultura no Cerrado. Em contrapartida, nos Argissolos Amarelos típicos distróficos coesos, observou-se um aumento significativo de 17,24% no estoque de C ($p \leq 0,05$), sugerindo maior capacidade de retenção de carbono em resposta ao uso agrícola.

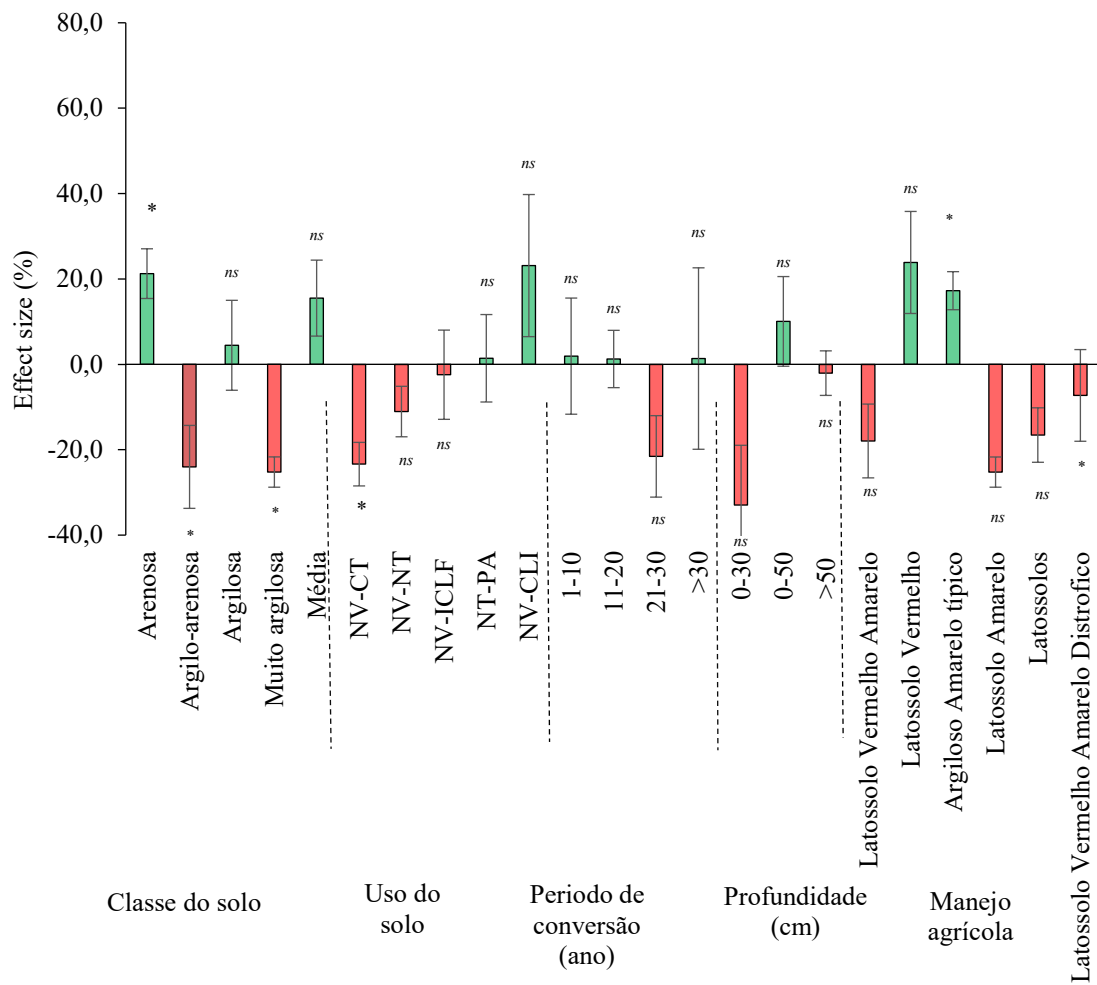


Figure 3. Resposta da influência da classe e textura do solo, profundidade avaliada, período da conversão e manejo agrícola no estoque de carbono.

3.2 Influência da Classe e Textura do Solo, Profundidade Avaliada, Período da Conversão e Manejo Agrícola nos Estoques de Nitrogênio

Em relação ao estoque de nitrogênio, não houve diferença estatística significativa nas classes texturais do solo. O observado na literatura que os solos de textura argilosa tendem a reter carbono e nitrogênio de forma mais eficiente, devido à maior superfície específica das partículas, o que favorece a formação de agregados estáveis e a proteção da matéria orgânica contra a decomposição microbiana. Por outro lado, solos arenosos, em função de sua menor superfície específica e ausência de cargas na superfície não retêm elementos químicos. Porém os resultados observados podem ser explicados pela eficiência das práticas de manejo adotadas e dos aportes de matéria orgânica nos solos em estudo, favorecendo o aumento dos estoques de N no solo.

Os Latossolos Amarelo apresentaram aumentos de 33,21% com significância estatística ($p \leq 0,05$). Por outro lado, os Latossolos Vermelho-Amarelo, quando submetidos ao cultivo agrícola, apresentaram uma queda com mais de 8,78% nos estoques de N. Os Neossolo Quartzarênico e Latossolos Vermelhos apresentaram um aumento não significativo de 12,73 % e 36,17 % respectivamente.

Para o estoque de N, verificou-se reduções significativas nos períodos de 21–30 anos (9,06%) e não significativas no período de 11-20 anos de 10,56 %. O aumento não significativo foi observado nos períodos de 1-10 anos e mais de 30 anos de 19,57% e 53,92 %.

O aumento não significativo neste período pode ser explicado pela introdução de práticas de manejo que promovem a conservação do solo e a adição de matéria orgânica, como o uso de adubos verdes ou práticas de cobertura do solo para os primeiros 10 anos de implementação.

Com relação ao manejo agrícola, o sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) demonstrou aumento significativo nos estoques de N (16,41%). Por outro lado, uma redução significativa nos estoques de N foi evidenciada nos sistemas de plantio convencional (CT) de 28,49%. Esses resultados indicam que os sistemas integrados como o ILP têm potencial para aumento e estabilização do N no bioma do Cerrado, em comparação aos sistemas convencionais, como evidenciado por Barbosa et al. (2022) em seu estudo onde os valores de estoque de N no ILP foram superiores ao plantio direto e nos resultados obtidos por Costa et al. (2020) onde o ILPF apresentou valores de estoque de N superiores aos demais sistemas avaliados.

Figueredo et al. (2020) sustentaram que os sistemas baseados em revolvimento intenso do solo aceleram a decomposição da matéria orgânica e comprometem a estabilidade dos estoques de C e N ao longo do tempo, justificando a perda de N nos sistemas de plantio convencional.

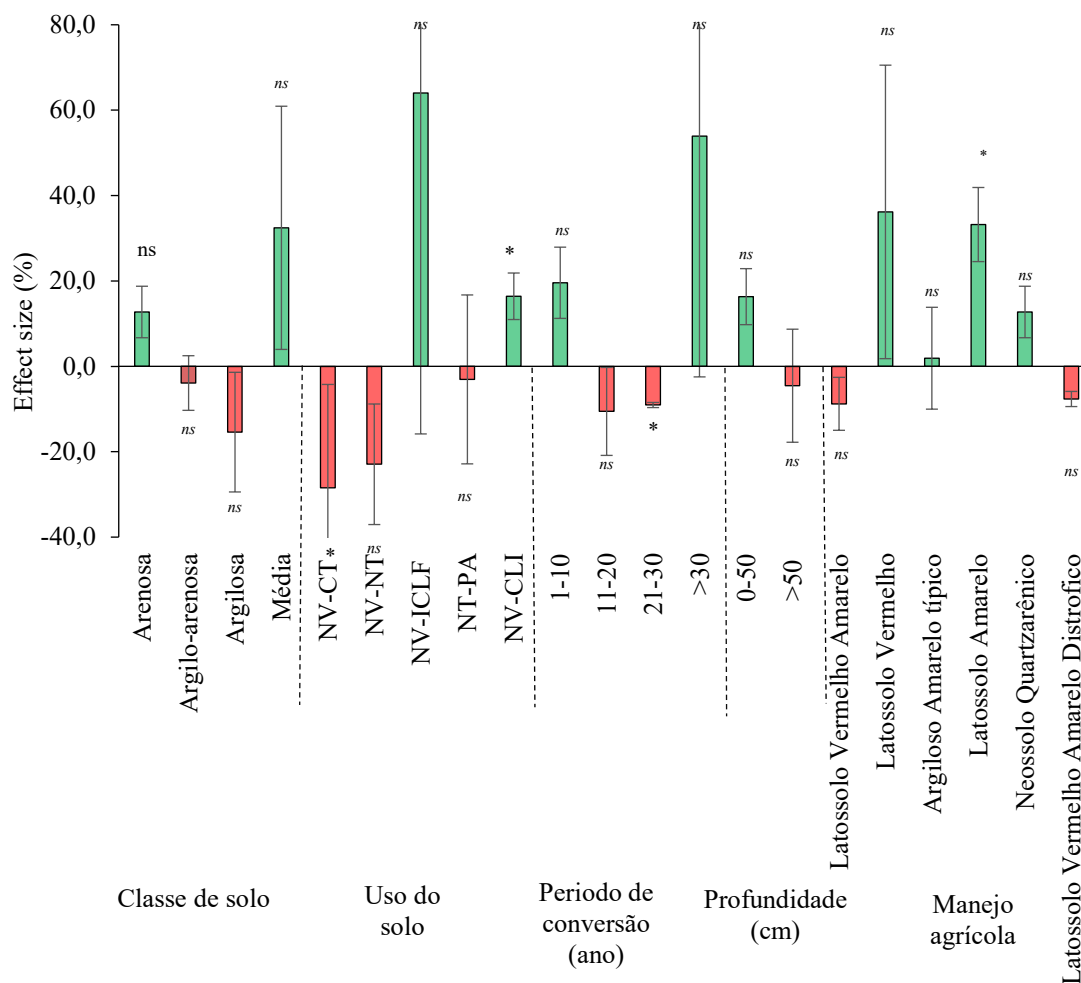


Figure 4. Resposta da influência da textura do solo, uso do solo, período, profundidade e tipo de solo no estoque de nitrogênio

3.3 Influencia da textura do solo, uso do solo, periodo, profundidade e tipo de solo no estoque de Carbono Organico Particulado.

Os estoques de COP também variaram, significativamente, entre os solos estudados. Os Neossolos Quartzarênicos mostraram uma redução significativa de 43,21% no COP ($p \leq 0,05$), evidenciando a vulnerabilidade desses solos arenosos à perda de COP após a mudança no uso da terra. O COP somente apresenta um mecanismo de proteção que é a recalcitrância dessa fração.

No caso do COP, a camada de >50 cm) houve redução significativa de 29,99% ($p < 0,05$). O maior aporte de COP, com a deposição dos resíduos agrícolas, se dá nas camadas superficiais do solo quando comparadas as camadas inferiores.

O carbono orgânico particulado apresentou reduções em todos os períodos avaliados. A perda foi estatisticamente significativa no intervalo de 21–30 anos, com redução de 26,87%.

O sistema de integração lavoura-pecuária (CLI) demonstrou aumento significativo nos estoques de COP (10,77%) e as pastagens uma redução significativa de COP (27,29%). Esses resultados mostram que, dependendo do sistema de manejo adotado nas pastagens (pasto produtivo ou degradado), as pastagens podem ter um efeito neutro ou negativo na dinâmica da matéria orgânica do solo, especialmente se não forem bem manejadas como o pasto degradado (Silva et al., 2024).

Por fim, no sistema de ILPF, observou-se decréscimo significativo no estoque de COP (49,60%).

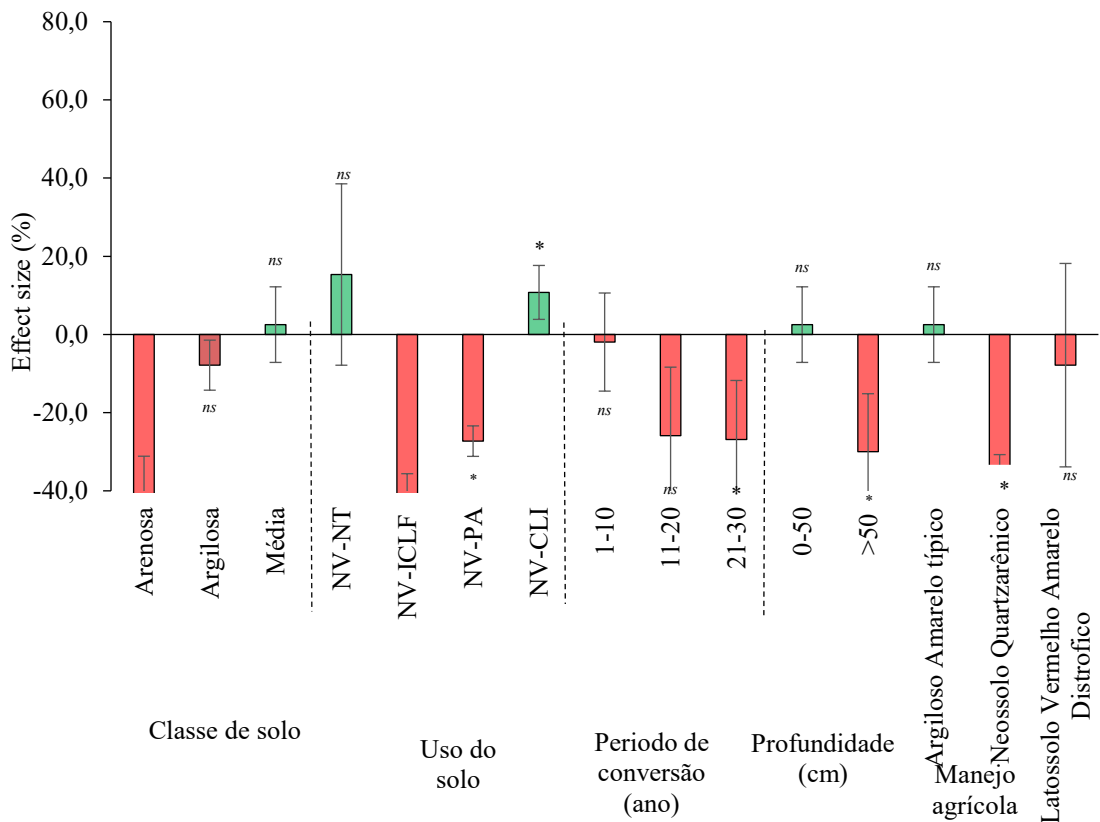


Figure 5. Resposta da influência da classe e textura do solo, profundidade avaliada, período da conversão e manejo agrícola no estoque de COP.

3.3 Influência da Classe e Textura do Solo, Profundidade Avaliada, Período da Conversão e Manejo Agrícola no Estoque de Carbono Orgânico Associado aos Minerais

No que se refere a classe do solo, houve aumento significativo de 20,05% nos Argissolos Amarelos, destacando sua capacidade de retenção de COAM, que é a forma

mais estável de C no solo, o que pode contribuir para a mitigação da perda de gás carbônico para a atmosfera. Cabe destacar que essa mesma classe de solo proporcionou aumentos significativos nos estoques de C no solo.

Foi observado no COAM aumento significativo de 20,01% na camada de 0-50 cm ($p = 0,05$), evidenciando a capacidade do solo em estabilizar o carbono até essa profundidade. De acordo com Cotufro & Lavallee (2022), os exsudatos radiculares e o carbono orgânico dissolvido em água podem ficar retidos nos minerais formando os COAM. Na camada >50 cm, houve uma redução não significativa de 2,77% ($p = 0,75$), indicando que a retenção de carbono pode ser menos influenciada pela conversão do uso da terra em maiores profundidades.

O comportamento do carbono orgânico associado aos minerais revelou aumento nos primeiros 20 anos após a conversão. Esse aumento foi significativo no período de 1–10 anos (23,43%) e não significativo no intervalo de 11–20 anos (8,73%). No entanto, no período de 21–30 anos, observou-se redução significativa de 25,21%, indicando que, a longo prazo, a estabilidade dessa fração do carbono pode ser comprometida. Essa tendência sugere que a capacidade do solo de manter o carbono associado à fração mineral pode ser afetado pela intensificação do uso agrícola ao longo do tempo.

Na pastagem, para as frações COAM, não foram observadas alterações, com valores próximos de zero. sugere que o manejo atual não promoveu o acúmulo ou perda significativa de carbono. Isso pode ocorrer devido a práticas de manejo inadequadas, como superpastejo, que podem impedir o aumento das frações de carbono. Além disso, o sistema de pastagem pode estar em um estado de equilíbrio, onde a taxa de entrada de carbono está equilibrada com a taxa de saída (Costa et al., 2020).

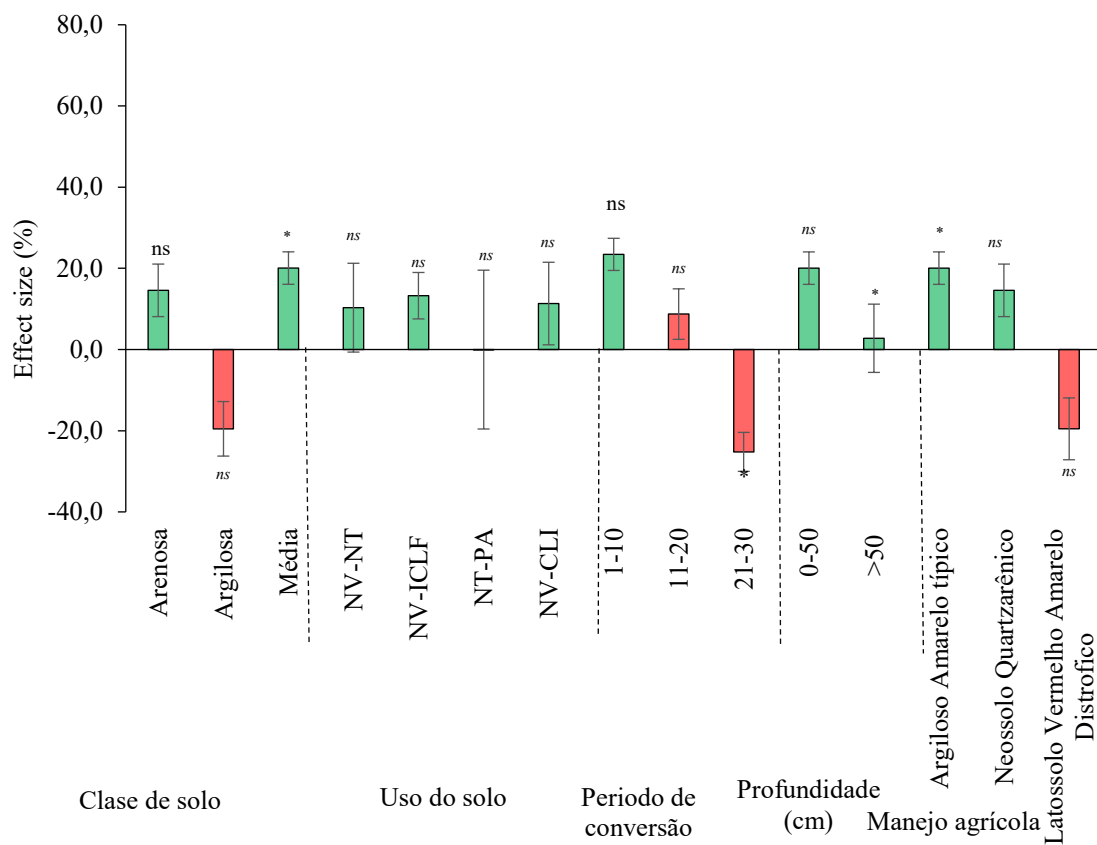


Figura 6. Resposta da influência da textura do solo, uso do solo, período, profundidade e tipo de solo no estoque de Carbono Orgânico Associados aos Minerais

4. CONCLUSÃO

A revisão sistemática mostra que a conversão de áreas sob vegetação nativa do Cerrado para sistemas agrícolas altera os estoques de C, N, COP e COAM no solo. A intensidade dessas mudanças varia conforme as classes de solo, a textura do solo, a camada avaliada, os sistemas de manejo do solo adotados e o tempo de conversão das práticas agrícolas.

Entre as classes de solo analisadas, o Argissolo Amarelo proporcionou aumento nos estoques de carbono. Esse comportamento está relacionado, ao incremento da fração estável COAM que também teve incremento nessa classe de solo. O Latossolo Amarelo, por sua vez, apresentou aumento no estoque de nitrogênio. Esse fato está, possivelmente, associado à proteção química da matéria orgânica por óxi-hidróxidos de ferro e alumínio presentes na fração mineral do solo. Os Neossolos Quartzarênicos reduziram os estoques de COP, fração que depende unicamente de sua recalcitrância como forma de proteção.

A profundidade do solo demonstrou influência direta sobre os estoques de COP mostrando que o maior estoque dessa fração se concentra na camada superficial do solo. O tempo de conversão foi um fator determinante, com declínio acentuado e significativo para os estoques de C, N, COP e COAM entre 21 e 30 anos após a mudança no uso da terra.

Entre os sistemas de manejo avaliados, o cultivo convencional foi associado às maiores perdas nos estoques de C e N, enquanto que a integração lavoura-pecuária demonstrou maior eficiência na preservação e recuperação dos estoques de C e N, bem como das frações granulométricas da matéria orgânica.

Esses resultados reforçam a importância da implementação das estratégias de práticas de manejo sustentáveis do solo, promovidas pelo Plano ABC e pelo Protocolo MRV, que permitem o aumento dos estoques de C e N e das frações granulométricas da matéria orgânica do solo.

5. CONCLUSÃO GERAL

Os resultados desta pesquisa demonstram que os diferentes sistemas de manejo agrícola influenciam significativamente os estoques de carbono e nitrogênio C, N, COP e COAM nos solos do Cerrado.

O primeiro capítulo confirmou o observado na literatura, que os sistemas agrícolas sustentáveis favorecem o acúmulo e a estabilização do carbono nos solos do Cerrado. Com relação aos estoques de C, não houve diferença entre a MN e os sistemas ILP em todas as camadas avaliadas. Também foi nesse sistema de manejo (ILP) e na área de referência (MN) que apresentaram os maiores estoques de carbono estável (COAM).

As PP e o ILP apresentaram maiores estoques de N no solo (0-10 e 0-30 cm). Quando se considera a camada de 1m, esses sistemas de manejo conservacionistas são maiores que a área de referência (MN). Conclui-se que a retirada da mata nativa de Cerrado para a entrada da agropecuária deve ser feita com cautela e utilizando práticas conservacionistas de manejo como ILP e PP.

A revisão sistemática de literatura realizada no segundo capítulo demonstrou que os diferentes sistemas de manejo agrícola influenciam de maneira significativa os estoques de carbono e nitrogênio no solo do Cerrado, bem como nas frações da matéria orgânica.

Os resultados mostraram que a conversão da vegetação nativa para sistemas agrícolas convencionais reduz expressivamente os estoques de C e N, sendo os Latossolos Vermelho-Amarelos os mais afetados, com perda de até 25,24% de C. Por outro lado, práticas conservacionistas, como a integração lavoura-pecuária, apresentaram potencial de reduzir essas perdas promovendo aumentos na retenção de carbono orgânico particulado. O sistema de integração lavoura-pecuária também propiciou ganhos nos estoques de N no solo. Além disso, o efeito do tempo de conversão foi evidente, com reduções mais expressivas dos estoques de C, N, COP e COAM após 21-30 anos de uso agrícola.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbosa, L.R.; Souza, H.A.; Teixeira, N.M.L.; Leite, L.F.C. Organic matter compartments in an Ultisol under integrated agricultural and livestock production systems in the Cerrado. **Ciência Rural**, v. 52, p. 20200845, 23 mar. 2022. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200845>
- Borenstein, M., Hedges, L.V., Higgins, J.P., Rothstein, H.R., 2010. A basic introduction to fixed-effect and random-effects models for meta-analysis. *Res. Synth. Methods* 1, 97–111. <https://doi.org/10.1002/jrsm.12>.
- Cambardella, C.A., Elliott, E.T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 56, 777–783. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>
- Costa, A. A.; Luduvico, G.A.; Macedo, I.L.M. Atributos físicos e estoque de carbono em áreas sob diferentes formas de uso do solo no Cerrado do Oeste da Bahia / Physical attributes and carbon stock in areas under different forms of use in Cerrado soil of west of Bahia. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 32294–32306, 29 maio 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n5-612>
- Cotrufo, M. F.; Lavelle, J. M. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. Em: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Elsevier, 2022. v. 172p. 1–66.
- Dos Santos, C.A., Rezende, C.D.P., Pinheiro, E.F.M., Pereira, J.M., Alves, B.J., Urquiara, S., Boddey, R.M., 2019. Changes in soil carbon stocks after land use change from native vegetation to pastures in the Atlantic Forest region of Brazil. *Geoderma* 337, 394–401. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.045>.
- FAO. **A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes –GSOC-MRV Protocol**. Rome. 2020, p. 5-20. 2020 <https://doi.org/10.4060/cb0509en>.
- Figueiredo, C. C.de.; Oliveira, A.D.de.; Santos, I.L.dos.; Ferreira, E.A.B.; Malaquias, J.V.; Sá, M.A.C.de.; Carvalho, A.M.de.; Junior, J.de.D.G.dos. Relationships between soil organic matter pools and nitrous oxide emissions of agroecosystems in the Brazilian Cerrado. **Science of The Total Environment**, v. 618, p. 1572–1582, mar. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.333>
- Figuerêdo, K. S. et al.; Pereira, M. T.J.; Silva, I.R.; Oliveira, T.S. Long-term changes in organic matter stocks and quality in an Oxisol under intensive vegetable cultivation.

- CATENA, v. 188, p. 104442, 1 maio 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104442>
- Filho, J. F. L.; de Oliveira, H.M.M.R.; de Sousa, V.M.; dos Santos, A.C.; de Oliveira, T.S. 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, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168251>
- Gmach, M.R.; Dias, B.O.; Silva, C.A.; Nóbrega, J.C.A.; Lustosa, F.J.F.; Siqueira, N.M. Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 14, p. e00178, set. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00178>
- Hedges, L.V., Gurevitch, J., Curtis, P.S., 1999. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology* 80, 1150–1156. <https://doi.org/10.1890/0012-9658>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística -IBGE.2024
<https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/territorio/18307-biomas-brasileiros.html>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2019. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems (eds Shukla, P. R. et al.).
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>
- Locatelli, J. L.; Santos, J. L.; Cherubin, M. R.; Cerri, C. E, P. Changes in soil organic matter fractions induced by cropland and pasture expansion in Brazil's new agricultural frontier. **Geoderma Regional**, v. 28, p. e00474, mar. 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00474>
- Medeiros, A. D. S.; Cesário, F. V.; Maia, S. M. F. Long-term impact of conventional management on soil carbon and nitrogen stocks in the semi-arid region of Brazil: A meta-analysis. **Journal of Arid Environments**, v. 218, p. 105052, nov. 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.105052>
- Medeiros, A. D. S.; Cesário, F. V.; Santos, T. C. dos. Maia, S. M. F. Differences in the storage of soil organic carbon in Brazil's agricultural land: A meta-analysis. **CATENA**, v. 249, p. 108680, fev. 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108680>

- Oliveira, A. F. de.; Menezes, G. L.; Gonçalves, L. C.; Araujo, L. C. de.; Ramirez, M. A.; Guimarães, J. R.; Jayme, D. G.; Lana, A. M. Q. Pasture traits and cattle performance in silvopastoral systems with Eucalyptus and Urochloa: Systematic review and meta-analysis. **Livestock Science**, v. 262, p. 104973, ago. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.104973>
- Silva, D. de. O.; Moitinho, M.R.; Panosso, A. R.; Oliveira, D. M. S.; Montanari, R.; Moares, M. L.T.; Milori, D. M. B. P.; Bicalho, E. S.; Jr, N. L. S. Implications of converting native forest areas to agricultural systems on the dynamics of CO2 emission and carbon stock in a Cerrado soil, Brazil. **Journal of Environmental Management**. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120796>
- Sousa, C. E.S.de.; Junior, F.P.A.; Cardoso, A.da.S.; Cleef, F.de.O.S.V.; Pádua, F.T.de.; Almeida, J.C.de.C. Effects of integrating legumes or trees on soil C stock and organic matter dynamics in tropical grasslands. **Applied Soil Ecology**, v. 202, p. 105560, 1 out. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105560>
- Viechtbauer, W., 2010. Conducting meta-analyses in R with the metafor package. *J. Stat. Softw.* 36, 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i03>.
- Vogado, R. F.; Souza, H.A.de.; Sagrilo, E.; Brito, L. de. C. R. de.; Matias, S. S.R.; Neto, M.L.T.; Junior, J.O.L.de.O.; Andrade, H.A.F.de.; Leite, L.F.C. Soil organic carbon stocks and fractions under integrated systems and pasture in the Cerrado of Northeast Brazil. **CATENA**, v. 243, p. 108196, 1 ago. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108196>
- Xavier, K. S. Estoque de carbono e nitrogênio em áreas sob diferentes usos e classes do solo no cerrado do oeste baiano. 27 nov. 2023. <https://saberaberto.uneb.br/handle/20.500.11896/5015>

7. ANEXOS

Estatística descritiva de Estoque de Carbono

Profundidade	Teste de Normalidade	Homogeneidade das Variâncias	Coefficiente de Variação
0-10 cm	0,866	0,171	15,69%
0-30 cm	0,722	0,171	19,93%
0-100 cm	0,571	0,393	17,41%

Estatística descritiva de Estoque de Nitrogênio

Profundidade	Teste de Normalidade	Homogeneidade das Variâncias	Coefficiente de Variação
0-10 cm	0,198	0,082	20,05%
0-30 cm	0,334	0,862	16,13%
0-100 cm	0,779	0,318	19,05%

Estatística descritiva de Carbono Orgânico Particulado

Profundidade	Teste de Normalidade	Homogeneidade das Variâncias	Coefficiente de Variação
0-5 cm	0,35	0,06	31%
5-10 cm	0,29	0,05	33,6%
10-20 cm	0,19	0,25	32,8%
20-30 cm	0,90	0,17	35,6%

Estatística descritiva de Carbono Orgânico Associado aos Minerais

Profundidade	Teste de Normalidade	Homogeneidade das Variâncias	Coefficiente de Variação
0-5 cm	0,66	0,81	19,74%
5-10 cm	0,08	0,05	31,59%
10-20 cm	0,09	0,06	32,38%
20-30 cm	0,99	0,55	21,51%

Estatística descritiva de Estoque de Carbono Orgânico Particulado

Profundidade	Teste de Normalidade	Homogeneidade das Variâncias	Coefficiente de Variação
0-5 cm	0,42	0,46	37,3%
5-10 cm	0,44	0,05	30,08%
10-20 cm	0,36	0,05	35%
20-30 cm	0,61	0,22	34,7%

Estatística descritiva de Estoque de Carbono Orgânico Associado aos Minerais

Profundidade	Teste de Normalidade	Homogeneidade das Variâncias	Coefficiente de Variação
0-5 cm	0,53	0,85	19,82%
5-10 cm	0,16	0,07	37,39%
10-20 cm	0,18	0,08	30,26%
20-30 cm	0,85	0,71	19,94%