

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

DISSERTAÇÃO

**Estoques de Carbono e Nitrogênio e Agregação do Solo em
Diferentes Sistemas de Produção Agrícola Sustentáveis e em
Vegetação Nativa no Cerrado**

Vanessa Cristine Serra Pereira

2024



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

**ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO E AGREGAÇÃO DO SOLO EM
DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA SUSTENTÁVEIS E EM
VEGETAÇÃO NATIVA NO CERRADO**

VANESSA CRISTINE SERRA PEREIRA

*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 Meio Ambiente/ Poluição Ambiental e Resíduos Agroindustriais.

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2024

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

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

P436e

Pereira, Vanessa Cristine Serra, 31/03/1997-
Estoques de Carbono e Nitrogênio e Agregação do
Solo em Diferentes Sistemas de Produção Agrícola
Sustentáveis e em Vegetação Nativa no Cerrado /
Vanessa Cristine Serra Pereira. - São Luís, 2024.
48 f.

Orientadora: Érika Flávia Machado Pinheiro.
Coorientador: David Vilas Boas De Campos.
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola e Ambiental, 2024.

1. Gases de efeito estufa. 2. integração lavoura
pecuária. 3. Panicum maximum cv Miyagui. I. Pinheiro,
Érika Flávia Machado, 1975-, orient. II. Campos, David
Vilas Boas De, 1972-, coorient. III Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós
Graduação em 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**

VANESSA CRISTINE SERRA PEREIRA

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 Meio Ambiente/ Poluição Ambiental e Resíduos Agroindustriais.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 02/02/2024.

Érika Flávia Machado Pinheiro. Dra. UFRRJ
(Orientadora)

Ednaldo da Silva Araújo. Dr. Embrapa

Ana Carolina de Souza Ferreira. Dra. UFRRJ



ATA Nº 189/2024 - PPGEAAMB (12.28.01.00.00.00.40)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 07/02/2024 11:09)

ERIKA FLAVIA MACHADO PINHEIRO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DATS (11.39.00.35)
Matrícula: ####408#9

(Assinado digitalmente em 08/02/2024 13:06)

ANA CAROLINA DE SOUZA FERREIRA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ####.###.607-##

(Assinado digitalmente em 07/02/2024 08:53)

VANESSA CRISTINE SERRA PEREIRA
DISCENTE
Matrícula: 2021#####8

(Assinado digitalmente em 15/02/2024 20:16)

EDNALDO DA SILVA ARAÚJO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ####.###.133-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número: 189, ano: 2024, tipo: ATA, data de emissão: 07/02/2024 e o código de verificação: 60d583412c

DEDICATÓRIA

A Deus, meu grande e fiel amigo, e aos meus pais, por sempre acreditarem em mim e apoiarem as minhas escolhas. Sem vocês, eu nada seria!

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, por ter me proporcionado essa oportunidade e por reforçar minha fé em todos os momentos de angústia. Todos os momentos com Deus foram essenciais para eu continuar em busca do meu objetivo.

Aos meus pais, Lília Bárbara e Vilson José, pela educação que me proporcionaram, pelos sacrifícios e por acreditarem no meu potencial. À minha irmã Lívia Serra e ao meu sobrinho Luís Ricardo, por todos os momentos de descontração. Não foi fácil sair da zona de conforto, mas sem o apoio e orações da minha família seria muito mais difícil.

À minha orientadora, Profa. Dra. Érika Flávia Machado Pinheiro, em que agradeço imensamente, por toda confiança, pela gigantesca paciência, carinho, amizade, compreensão, ensinamentos, por ser uma grande inspiração e por todas as oportunidades de crescimento pessoal e profissional que me proporcionou. Todas as nossas conversas, sejam elas científicas ou não, foram essenciais nessa caminhada.

A minha amiga Clenya Oliveira, por ter me incentivado a fazer a inscrição no programa de mestrado e ao meu amigo Fernando Ferreira. Obrigada por todos os momentos que passamos juntos, sejam eles de alegrias, angústias e até dividindo as contas da casa, vocês foram essenciais nesses dois anos de mestrado.

Aos amigos que fiz nessa trajetória, em especial, Paula Fernanda, Amanda Sales, André Parente, Tancio Gutier, Nivaldo Sátiro, Stallone Soares e Wesley Souza, por todo apoio e momentos de diversão.

Às minhas amigas Gabriella Borges e Mayara Bezerra, às minhas primas Maria Vitória, Ana Lícia e Ana Clara por compreenderem minha ausência, pelo incentivo, pelas chamadas de vídeo e por sempre me ouvirem.

Aos integrantes do Laboratório de Matéria Orgânica do Solo, por toda ajuda na execução da pesquisa, pelos momentos de descontração e companheirismo. Em especial à Jennifer dos Santos, Natália Machado, Raquel Dias, Ana Carolina, Izabela Gouveia e Lucas Honda por sempre estarem dispostos a me ajudarem e por serem pessoas que eu quero levar para além do mestrado.

À Embrapa Solos, pela execução das análises, principalmente ao meu coorientador David Villas Boas de Campos, por estar sempre disposto a tirar minhas dúvidas, pelos conselhos e amizade.

A todos os integrantes do Projeto Rural Sustentável – Cerrado (PRS-Cerrado) que de alguma forma me auxiliaram na execução da pesquisa.

Ao Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS).

À UFRRJ, em especial ao PPGEAAMB pela qualidade de ensino, por todo apoio necessário durante o curso e agradeço imensamente a todos os funcionários da Instituição que fizeram parte da minha jornada.

Por fim, à todas as pessoas que de alguma forma estiveram juntos comigo, me acolheram, me deram conselhos e me incentivaram.

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

Muito Obrigada!

BIOGRAFIA

Vanessa Cristine Serra Pereira, nasceu na cidade de São Luís, Maranhão, em 31 de março de 1997, filha de Lília Bárbara Costa Serra e Vilson José de Carvalho Pereira. Concluiu o ensino médio no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – Campus Monte Castelo (IFMA), em 2014. Iniciou a graduação em Engenharia Agronômica em agosto de 2015 na Universidade Estadual do Maranhão (UEMA) e concluiu em agosto de 2021. Durante a graduação foi voluntária em projetos de extensão rural, de julho de 2017 a julho de 2018, iniciou na área científica quando foi bolsista de iniciação científica pela Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA), no laboratório de Entomologia, de julho de 2018 a julho de 2019 e estagiou na Companhia Nacional de Abastecimento do Maranhão (CONAB-MA), de janeiro de 2020 a junho de 2021. Em novembro de 2021, 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

PEREIRA, Vanessa Cristine Serra. Estoques de Carbono e Nitrogênio e agregação do solo em Diferentes Sistemas de Produção Agrícola Sustentáveis e em Vegetação Nativa no Cerrado. 2024. 48 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2024.

O Brasil ocupa o quarto lugar entre os maiores emissores de gases de efeito estufa (GEE), devido, às mudanças no uso da terra e a produção agropecuária. Neste cenário destaca-se o bioma Cerrado que reduziu 152,7 mil km² de sua vegetação natural, que pode resultar em alterações nos ciclos biogeoquímicos do C, N, P e S. Um dos maiores desafios do setor agrícola é adotar estratégias de manejo do solo sustentáveis que contribuam na recuperação de áreas degradadas que auxiliem na mitigação das emissões de GEE e que promovam a fixação do C no solo na forma de matéria orgânica do solo (MOS). Este estudo teve como objetivo geral avaliar a os estoques de C e N, a agregação do solo, assim como as frações ativa e estável da MOS, sob diferentes sistemas de manejo agrícolas sustentáveis, comparando-os com áreas de vegetação nativa, no bioma Cerrado. O estudo foi realizado em uma fazenda localizada na cidade de Unaí no Estado de Minas Gerais, avaliando três tratamentos: i) Mata Nativa (MN); ii) Pasto Produtivo (PP) e; iii) Integração lavoura-pecuária (ILP). Em cada tratamento foram abertas 3 trincheiras e foram coletadas amostras de terra deformadas e indeformadas nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. Foram realizadas análises físicas e químicas do solo, os teores de C e N em todas as profundidades amostradas. Os estoques de C e N foram feitos nas camadas 0-10, 0-30 e 0-100 cm e , o fracionamento granulométrico da MOS (0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm). Além disso, nas mesmas trincheiras foram coletadas blocos de terra nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, para a determinação da estabilidade dos agregados do solo. O experimento foi realizado utilizando o delineamento inteiramente casualizado (DIC) com três repetições. Para a análise estatística foi aplicada a análise de variância com o teste de comparação de médias pelo teste de Tukey à 5% de significância. Os resultados mostraram que, os teores e os estoques de C no solo foram maiores no PP do que na MN. Esse resultado pode ser devido à não perturbação do solo por máquinas agrícolas e a maior deposição de material orgânico por superfície e subsuperfície. O mesmo comportamento foi observado para os teores e estoques de N, exceto na camada de 0-100 cm que não foi observada diferença estatística significativa entre a MN e o PP. O sistema ILP se manteve igual a MN, diferindo estatisticamente quanto aos teores de C somente nas profundidades de 40-60 e 60-80 cm. Porém, os estoques de C foram reduzidos na ILP (~ 47 Mg C ha⁻¹) apresentando, aproximadamente, a metade dos estoques de C da MN e somente 31% dos estoques de C da PP. Uma provável explicação é o curto tempo de implantação desse sistema, com apenas quatro anos. Esses resultados foram refletidos nas frações lábeis e estáveis da MOS. Para o carbono orgânico particulado (COP), a área de PP apresentou as maiores concentrações nas camadas superficiais (0-5 e 5-10 cm), não diferindo da MN nas demais profundidades avaliadas. A explicação é o aporte de raízes. Para o carbono orgânico associado aos minerais (COAM), que é o carbono estável, ou seja, fixado no solo, a retirada de MN para PP não acarretou em diferença. O PP foi igual ou superior a MN nas profundidades avaliadas. O maior diâmetro médio ponderado dos agregados do solo foi na MN e no PP, que não diferiram estatisticamente nas duas profundidades. Conclui-se que, avaliando os atributos físicos e químicos do solo, sistema de manejo do solo PP pode ser utilizados em Unaí, bioma Cerrado, visando a manutenção da segurança do solo. O sistema ILP apresenta potencial de ser utilizado, os resultados obtidos são reflexo de um curto tempo de implantação desse sistema, necessitando de um maior período de monitoramento.

Palavras chave: Gases de efeito estufa, integração lavoura-pecuária, *Panicum maximum* cv *Miyagui*.

ABSTRACT

PEREIRA, Vanessa Cristine Serra. Carbon and Nitrogen Stocks and Soil Aggregation in Different Sustainable Agricultural Production Systems and Native Vegetation in the Cerrado. 2024. 49 p. Dissertation (Master's Degree in Agricultural and Environmental Engineering). Technology Institute, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2024.

Brazil ranks fourth among the largest emitters of greenhouse gases (GHG), due to changes in land use and agricultural production. In this scenario, the Cerrado biome stands out, which reduced 152.7 thousand km² of its natural vegetation, which can result in changes in the biogeochemical cycles of C, N, P and S. One of the biggest challenges for the agricultural sector is adopting management strategies for the sustainable soils that contribute to the recovery of degraded areas that help to mitigate GHG emissions and that promote the fixation of C in the soil in the form of soil organic matter (SOM). This study had the general objective of evaluating C and N stocks, soil aggregation, as well as the active and stable fractions of SOM, under different sustainable agricultural management systems, comparing them with areas of native vegetation, in the Cerrado biome. The study was carried out on a farm located in the city of Unaí in the State of Minas Gerais, evaluating three treatments: i) Native Forest (MN); ii) Productive Pasture (PP) and; iii) Crop-livestock integration (ILP). In each treatment, 3 trenches were opened and deformed and undisturbed soil samples were collected at depths 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 and 80-100 cm. Physical and chemical analyzes of the soil and C and N contents were carried out at all depths sampled. The C and N stocks were made in layers 0-10, 0-30 and 0-100 cm and the particle size fractionation of the SOM (0-5, 5-10, 10-20 and 20-30 cm). Furthermore, blocks of earth were collected in the same trenches at depths of 0-5 and 5-10 cm, to determine the stability of soil aggregates. The experiment was carried out using a randomized design with three replications. For statistical analysis, analysis of variance was applied with the mean comparison test using the Tukey test at 5% significance. The results showed that C levels and stocks in the soil were higher in PP than in MN. This result may be due to the non-disturbance of the soil by agricultural machinery and the greater deposition of organic material on the surface and subsurface. The same behavior was observed for N contents and stocks, except in the 0-100 cm layer where no statistically significant difference was observed between MN and PP. The ILP system remained the same as MN, differing statistically in terms of C content only at depths of 40-60 and 60-80 cm. However, C stocks were reduced in the ILP (~ 47 Mg C ha⁻¹), presenting approximately half of the C stocks in the MN and only 31% of the C stocks in the PP. A likely explanation is the short time it took to implement this system, just four years. These results were reflected in the labile and stable fractions of SOM. For particulate organic carbon (COP), the PP area presented the highest concentrations in the superficial layers (0-5 and 5-10 cm), not differing from the MN in the other depths evaluated. The explanation is the contribution of roots. For organic carbon associated with minerals (COAM), which is stable carbon, that is, fixed in the soil, the removal of MN to PP did not result in any difference. The PP was equal to or greater than the MN at the depths evaluated. The largest weighted average diameter of soil aggregates was in MN and PP, which did not differ statistically at the two depths. It is concluded that, by evaluating the physical and chemical attributes of the soil, the PP soil management system can be used in Unaí, Cerrado biome, aiming to maintain soil safety. The ILP system has the potential to be used, the results obtained are a reflection of the short implementation time of this system, requiring a longer period of monitoring.

Key-words: Greenhouse gases, crop-livestock integration, *Panicum maximum* cv *Miyagui*.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Detalhamento dos tratamentos avaliados com o histórico de uso da terra.	10
Tabela 2. Análise química do solo sob mata nativa, pasto produtivo e integração laboura-pecuária em Unaí (MG).....	14
Tabela 3. Análise granulométrica do solo sob mata nativa, pasto produtivo e integração laboura-pecuária em Unaí (MG).	15
Tabela 4. Densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) sob Mata Nativa de Cerrado, Pastagem Produtiva e Integração laboura-pecuária, em Unaí (MG).....	16
Tabela 5. Teores de C ($g\ kg^{-1}$ de solo) sob Mata Nativa (MN) de Cerrado, Pastagem Produtiva (PP) e Integração laboura-pecuária (ILP), em Unaí (MG).....	17
Tabela 6. Teores de N ($g\ kg^{-1}$ de solo) sob Mata Nativa de Cerrado, Pastagem Produtiva, e Integração laboura-pecuária, em Unaí (MG).....	17
Tabela 7. Relação C/N do solo sob Mata Nativa de Cerrado, Pastagem Produtiva, e Integração laboura-pecuária, em Unaí (MG).....	18
Tabela 8. Estoques de C ($Mg\ C\ ha^{-1}$) no solo sob Mata Nativa de Cerrado, Pastagem Produtiva e Integração laboura-pecuária, em Unaí (MG).....	19
Tabela 9. Estoques de N ($Mg\ N\ ha^{-1}$) no solo sob Mata Nativa de Cerrado, Pastagem Produtiva e Integração laboura-pecuária, em Unaí (MG).....	19
Tabela 10. Teores de COP no solo sob Mata Nativa de Cerrado, Pastagem Produtiva e Integração laboura-pecuária, em Unaí (MG).....	20
Tabela 11. Teores de COAM no solo sob Mata Nativa de Cerrado, Pastagem Produtiva e Integração laboura-pecuária, em Unaí (MG).....	21
Tabela 12. Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados do solo sob Mata Nativa de Cerrado, Pastagem Produtiva e Integração laboura-pecuária, em Unaí (MG).....	21

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo com a identificação dos perfis de solo abertos em cada tratamento avaliado. PP: Pasto produtivo; MN: Mata nativa; ILP: Integração laboura-pecuária.	9
Figura 2. Tratamentos avaliados: A) área sob vegetação nativa no bioma Cerrado (cerrado denso); B) área de pasto produtivo com capim Miyagui (<i>Panicum maximum</i> cv Miyagui) e C) área de Integração laboura-pecuária há 4 anos.	10
Figura 3. Coleta de amostras indeformadas de terra (A e B).	11

LISTA DE SÍMBOLOS

COAM	Carbono Orgânico Associado aos Minerais
COP	Carbono Orgânico Particulado
DMP	Diâmetro Médio Ponderado
DS	Densidade do Solo
GEE	Gases de Efeito Estufa
ILP	Integração Lavoura-pecuária
MN	Mata Nativa
MOS	Matéria Orgânica do Solo
MS	Massa Seca
PP	Pasto Produtivo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 Bioma Cerrado	2
2.2 Importância da Matéria Orgânica do Solo	4
2.2.1 Compartimentos do Carbono no Solo: Carbono Orgânico Associado aos Minerais (COAM) e Carbono Orgânico Particulado (COP)	4
2.3 Estrutura do Solo em Sistemas Agrícolas Conservacionistas no Cerrado	5
2.4.1 Os Sistemas Integrados de Produção Agrícola	7
2.4.2 Sistemas integrados com a introdução de <i>Miyagi</i>	8
3. MATERIAL E MÉTODOS	9
3.1 Localização e Caracterização Edafo-Climáticas da Área de Estudo	9
3.2 Histórico da Área de Estudo	10
3.3 Coleta das amostras de terra deformadas e indeformadas	10
3.3.1 Preparo das amostras de terra e análises físicas e químicas do solo	11
3.4 Teores e estoques de carbono e nitrogênio no solo	12
3.5 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo	12
3.6 Estabilidade dos agregados do solo	13
3.6.1 Separação dos agregados estáveis em água por tamanho	13
3.7 Análise estatística	13
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
4.1 Análise química do solo	14
4.2 Análises físicas do solo	15
4.2.1 Análise granulométrica do solo	15
4.2.2 Densidade do solo	16
4.2.3 Teores de carbono e nitrogênio total no solo	16
4.2.4 Estoques de C e N no solo	18
4.3 Fracionamento Físico da MOS	20
4.3.1 Carbono orgânico particulado	20
4.3.2 Carbono orgânico associado aos minerais	20
4.4 Estabilidade dos agregados do solo	21
5 CONCLUSÃO	22
REFERÊNCIAS	23

1 INTRODUÇÃO

O Cerrado é o segundo maior bioma do Brasil, compreendendo aproximadamente 23% de todo o território brasileiro. Possui uma grande importância ecológica, sendo caracterizado por uma paisagem única, é rico em biodiversidade, produção de grãos, carne, fibras e madeira (Lopes; Daher, 2008). Mas, desde a década de 60 vem sofrendo a degradação ocasionada pelo desmatamento para a implantação de pastagens através de práticas de manejo inadequadas, o que ocasionou em perdas da MOS e de nutrientes em um solo que, naturalmente, já possui como características a baixa fertilidade, acidez, com elevados teores de ferro e alumínio.

Com base em um levantamento realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), entre os anos de 2000 e 2018, o Cerrado foi o segundo bioma com maior perda de cobertura natural, com redução de 152,7 mil km², e aumento na área de agricultura de 102,6 mil km², o que acarretou mudanças nos ciclos biogeoquímicos do C e de nutrientes como N, P e S (Pachauri; Reisinger, 2007), tornando-se importantes fontes de emissões de GEEs (Lal, 2020).

Segundo dados da Berkeley Earth, do período pré-industrial (278 mg L⁻¹) até hoje (424 mg L⁻¹), houve um aumento significativo nas concentrações das emissões de gás carbônico (CO₂) e de outros gases de efeito estufa (GEEs) na atmosfera que acarretaram num aumento médio global na temperatura de mais de 1,5 °C no ano de 2023, sendo considerado o ano mais quente da história da Terra. O Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (IPCC) considera as atividades agrícolas uma das responsáveis pelas alterações na composição atmosférica, especialmente em países que tem esse setor como uma das suas principais atividades econômicas (Lal, 2014; Houghton 2014; Le Quéré *et al.*, 2014 e 2015).

Sendo assim, as mudanças no uso da terra correspondem à um quarto do total das emissões globais desses gases (Laborde *et al.*, 2021) e estudos científicos comprovam que ao adotar práticas conservacionistas pode ocorrer o aumento significativo de estoques de C e N no solo em relação ao convencional (Lugato *et al.*, 2017; Machado, 2005; Silva *et al.*, 2013), sendo o C um indicativo de qualidade do solo utilizado quanto ao impacto das atividades antrópicas no meio ambiente.

Atualmente, um dos maiores desafios ambientais é reverter a degradação agrícola restaurando os ecossistemas naturais (Metzger *et al.*, 2017). Por isso, o setor agrícola requer a adoção de tecnologias que foquem na implementação de sistemas de manejo sustentáveis que contribuam para a recuperação de áreas degradadas. Uma das principais estratégias atuais está relacionada ao estoque de COS, pois ele atua mitigando a concentração de CO₂ na atmosfera (Dossou-Yovo *et al.*, 2016) ao armazenar C na forma de MOS (Lal, 2016; Lal, 2004) que é o principal indicador de qualidade do solo, compreende em sua composição 58% de C e atua na conservação da maioria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo.

A diminuição da MOS pode resultar em prejuízos à estabilidade estrutural do solo, diminuindo o tamanho e à estabilidade dos agregados (Rabbi *et al.*, 2015; Ribon *et al.*, 2014), que são unidades estruturais importantes que influenciam na infiltração da água, na biodiversidade, na biomassa do solo, aeração, erosão (Chevallier *et al.*, 2004; Bossuyt *et al.*, 2005). Além disso, o agregado é um mecanismo de proteção física do C nos solos favorecendo seu acúmulo e manutenção (Six *et al.*, 2004).

Na Conferência das Nações Unidas para as Mudanças Climáticas (COP15), o governo brasileiro assumiu o compromisso de incentivar boas práticas agrícolas afim de promover a agricultura de baixa emissão de carbono (Plano ABC), que está previsto em lei (Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009) que teve como objetivo a redução de 133,9 a 162,9 milhões t CO₂eq entre 2010 e 2020, e que com o sucesso, no acordo de Paris em 2015, o país decidiu dar continuidade ao compromisso com a continuação do plano ABC, passando a chamar ABC+.

Neste sentido, uma das práticas adotadas para recuperar áreas degradadas, mitigar as emissões de GEEs e aumentar a produtividade é a integração lavoura-pecuária, que é uma prática que integra atividades agrícolas e pecuárias na mesma área de forma consorciada, rotação ou sucessão ocasionando um efeito maior devido a interação dos agroecossistemas (Balbino *et al.*, 2011, Vilela *et al.*, 2011, Kluthcouski *et al.*, 2015).

Em 2020, o Painel Técnico Intergovernamental sobre Solos (ITPS) da Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO) lançou o Protocolo GSOC MRV que se baseia em um conjunto de medidas para a Monitoramento, Relato e Verificação das alterações do carbono nos solos e das emissões de GEEs em paisagens agrícolas que adotam práticas de manejo sustentáveis no solo, o protocolo pode ser utilizado tanto por produtores quanto por outros setores que estejam interessados em medir os estoques de CO₂ e as alterações e emissões de GEE (FAO, 2020).

Desse modo, a presente pesquisa irá avaliar os estoques de carbono e nitrogênio no solo, a agregação do solo, assim como as frações ativa e estável da matéria orgânica do solo (MOS), sob diferentes sistemas de manejo agrícolas sustentáveis, comparando-os com áreas de vegetação nativa, no bioma Cerrado. Visa-se obter recomendações de manejo do solo para o Cerrado que minimizem o impacto ambiental e, consequentemente, que promovam a segurança do solo, utilizando-se da hipótese de que a substituição da vegetação nativa do Cerrado por sistemas de manejo conservacionistas de produção agropecuária pode contribuir na manutenção e/ou no aumento dos estoques de C e N no solo, assim como na manutenção da estrutura do solo com agregação. Avaliar os estoques de carbono e nitrogênio no solo, a agregação do solo, assim como as frações ativa e estável da matéria orgânica do solo, sob diferentes sistemas de manejo agrícolas sustentáveis, comparando-os com áreas de vegetação nativa, no bioma Cerrado. Visa-se obter recomendações de manejo do solo para o Cerrado que minimizem o impacto ambiental e, consequentemente, que promovam a segurança do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Bioma Cerrado

O Cerrado ocupa o segundo lugar em extensão territorial entre os biomas brasileiros, ocupando mais de 204,7 milhões de hectares, o que corresponde a 23,3% do território brasileiro (IBGE, 2019). O bioma Cerrado compreende estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Rondônia, Goiás, Tocantins, Maranhão, Piauí, Bahia, Minas Gerais, São Paulo e o Distrito Federal (Franco, 2016).

Esse bioma é composto por um mosaico de diferentes tipos de vegetação resultantes da diversidade dos solos, da topografia e da diversidade de climas existentes nessa extensa região (Malheiros *et al.*, 2016). Na época de seca, as médias mensais de precipitação variam entre ~ 5–25 mm, as temperaturas médias máximas atingem, aproximadamente, entre 24 e 26 °C e a umidade relativa do ar pode atingir valores entre 20 e 40% (IBGE, 2019).

Sua fitofisionomia engloba formações florestais (Mata Ciliar, Mata Galeria, Mata Seca e Cerradão), savânicas (Cerrado Denso, Cerrado *stricto sensu*, Cerrado Ralo, Parque de Cerrado, Palmeiral, Vereda e Cerrado Rupestre) e campestres (Campo Rupestre, Campo Sujo e Campo Limpo) (Ribeiro & Walter, 2008).

A junção de todos os fatores naturais presentes no Cerrado juntamente com a ação antrópica, leva o Cerrado a apresentar vários focos de incêndio na vegetação ao longo da estação de seca (normalmente causada pela ação antrópica) e na época de chuvas, ocasionada pela descarga elétrica dos raios, o que tornou as espécies do cerrado adaptadas ao fogo tanto morfológicamente quanto fisiologicamente (Bond & Wilgen, 1996), características também observadas em outras áreas de savanas ao redor do mundo (Miranda *et al.*, 2009).

O Cerrado é considerado a segunda maior reserva de água doce subterrânea do mundo, responsável pela formação e alimentação de três grandes rios continentais: os aquíferos Guarani, Bambuí e Urucuia. O aquífero Guarani é um dos maiores rios do mundo em extensão e tem volume suficiente para abastecer 2,5 vezes a população brasileira, ou seja, cerca de 535 milhões de pessoas (Oliveira, *et al.*, 2021).

É um bioma rico em espécies vegetais e possui alta heterogeneidade espacial, por isso é classificado como a savana tropical, pois abriga a maior biodiversidade da Terra, correspondendo a 5% do planeta (Strassburg *et al.*, 2017). É considerado o bioma que apresenta a menor porcentagem de áreas protegidas, com somente 8,21% legalmente protegida por unidades de conservação, onde 2,85% são por unidades de conservação de proteção integral (Françoso *et al.*, 2015) e 5,36% são de unidades de conservação com finalidade sustentável (BRASIL, 2019).

É considerado um dos *hotspots* mundiais devido a sua riqueza ecológica e a ameaça significativa que enfrenta devido à conversão do ecossistema natural para as atividades antrópicas (Myers *et al.*, 2000). É uma região conhecida como ecótona devido as diferentes interações ecológicas e pela rica biodiversidade presente dessas regiões (Morgan *et al.*, 2020).

Por possuir solos profundos e uma topografia que beneficia a agricultura mecanizada, grande parte de seu território é utilizado para o cultivo agrícola (Guareschi *et al.*, 2016). O avanço da fronteira agrícola começou a ficar significativo desde a década de 60, quando a região foi ocupada por áreas de pastagens por ser a forma mais rápida que o governo brasileiro encontrou de ocupar o país e pelo aumento da demanda da produção de alimentos, tanto para suprir as necessidades do Brasil quanto para atender as demandas de outras partes do mundo (Silva, 2016).

Entre 1985 a 2017, estimou-se que 24,7 milhões de hectares de mata nativa do cerrado foi convertida para diversos usos, em especial para pastagens e cultivos agrícolas (Sano *et al.*, 2019; Alencar *et al.*, 2020), em sua maior parte mal manejadas sem a preocupação com a reposição de nutrientes no solo e, por isso hoje há muitas áreas degradadas, sem cobertura vegetal, início de erosão, alterações nos principais elementos químicos e redução significativa nos teores de C no solo (Loss *et al.*, 2014; Freitas *et al.*, 2018), o que provoca mais emissão de GEEs para a atmosfera (Fracetto *et al.*, 2015) colocando o Brasil em 5^a posição entre os principais emissores de GEE (Sano *et al.*, 2019; Bacani *et al.*, 2019) e desequilíbrio na dinâmica da MOS (Sturmer *et al.*, 2011).

É imprescindível a adoção de práticas que visem a sustentabilidade no cultivo agrícola (Franco *et al.*, 2020), pois, com a inversão das terras do Cerrado em áreas de cultivo agrícola, sem a preocupação com a qualidade do solo, e levando em conta a extrema importância da MOS, poderá provocar graves problemas de degradação, reduzindo sua qualidade e capacidade na ciclagem de nutrientes (Santos *et al.*, 2014).

Sabe-se que o agronegócio como um todo, com ênfase no Cerrado, ainda não é um ambiente totalmente sustentável, porém evidências científicas mostram que é possível conciliar as responsabilidades de conservação e restauração com a demanda dos mercados nacionais e internacionais para a produção de alimentos e energia, podendo ser alcançados através de métodos específicos de conservação e restauração para cada região (Sano *et al.*, 2018).

Hoje, é crucial a busca por práticas que visem a mitigação do aquecimento global, aumentando a produção de alimentos aliado ao crescimento sustentável, assim como, práticas de manejo estratégicas para o estoque e a estabilização de C no solo (Silva, 2013; Cotrufo, 2022), como o uso de sistemas de produção sustentáveis, que preservem o solo e se assemelhem aos da vegetação natural, onde o C encontra-se com valores praticamente constantes (Assunção *et al.*, 2019).

2.2 Importância da Matéria Orgânica do Solo

A MOS é considerada a principal indicadora da qualidade do solo, pois desempenha papéis cruciais e afeta vários aspectos do seu funcionamento (Rodrigues *et al.*, 2017).

É um recurso natural de extrema importância, que sustenta vários serviços ambientais que são vitais, tais como, a provisão de alimentos, o controle sobre as alterações climáticas, ciclagem de nutrientes promovendo a fertilidade e subsidiando a biodiversidade dos solos (Smith *et al.*, 2015). Sabe-se que a MOS e seu reservatório de C exercem um papel de grande importância tanto nas propriedades físicas (Madari *et al.*, 2005), quanto nas químicas (Medonça & Rowell 1996; Ramos & Cols. 2018) em solos de cultivo agrícola no Brasil, pois garante a qualidade do solo, que por sua vez, é essencial para garantia da produtividade agronômica, além de boas condições ambientais, a tornando assim, a base para a sustentabilidade agrícola (Lal, 2004).

A MOS é a principal forma de C encontrada no solo (Brady & Weil, 2008), sua quantidade e qualidade pode variar de acordo com o tipo e a origem do material orgânico que está entrando no solo, além de outras variáveis como fatores climáticos (Costa *et al.*, 2013). Entretanto, em sistemas de uso agrícola, o manejo e uso da terra influenciam diretamente nos estoques de MOS, podendo provocar a diminuição, manutenção ou aumento desses estoques (Bayer *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2003; Khorramdel *et al.*, 2013). Apesar da MOS ser considerada um indicador de qualidade do solo, os valores de carbono orgânico total (COT) nem sempre refletem a realidade de acordo com as alterações sofridas pelo uso e manejo do solo a curto prazo. Com isso, se faz necessário o conhecimento sobre as frações que constituem a MOS e sua distribuição terrestre (Rangel *et al.*, 2008). O entendimento acerca disso, permite que o uso dessas características possa ser usado para indicar a qualidade do solo no decorrer do tempo de cultivo (Rosset *et al.*, 2016).

Cada fração da MOS possui características distintas que estão relacionadas aos tipos de manejo adotados. São vários os métodos de fracionamento (químico e físico) para o seu estudo, e a escolha do mesmo depende do objetivo da pesquisa. O fracionamento físico pode ser feito pelo método densimétrico e granulométrico. O granulométrico consiste na separação da MOS em duas frações: carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e carbono orgânico particulado (COP) (Cambardella & Elliot, 1992). Nesse método, as frações são separadas por dispersão e peneiramento, sendo o COAM a fração orgânica associada à fração silte e argila ($COAM < 53\mu m$) e o COP é a fração orgânica associada à fração areia ($COP > 53\mu m$).

2.2.1 Compartimentos do Carbono no Solo: Carbono Orgânico Associado aos Minerais (COAM) e Carbono Orgânico Particulado (COP)

O carbono lável, ou COP – ou carbono novo, como também é conhecido, é o principal indicador de qualidade do solo usado para avaliar as diversas práticas de uso da terra em um curto período de tempo (Silva *et al.*, 2011). É definido como um conjunto de compostos orgânicos com um alto índice de mineralização, promovida pela biomassa microbiana presente no solo (Rangel *et al.*, 2008). Tem como principal função, o fornecimento de nutrientes às plantas, além de energia e carbono para a microbiota do solo (Silva *et al.*, 2011).

Considerando os mecanismos de formação dessas frações, os responsáveis pelo COP e COAM são, fundamentalmente, diferentes (Cotrufo *et al.*, 2015). O COP e COAM também são muito distintos quimicamente, acredita-se que isso se dá ao fato dessas frações possuírem caminhos diferentes em suas formações (Cotrufo *et al.*, 2015). De maneira geral, o COP é composto, em sua maioria, por fragmentos mais leves que não se decompõem rapidamente e são caracterizadas como as partículas que estão limitadas à proteção física exercidas pelos

agregados do solo (Golchin *et al.*, 1994); enquanto o COAM constitui-se por moléculas únicas ou uma porção microscópica de material orgânico que foram lixiviados direto da planta, ou que foram transformados quimicamente pelos microrganismos do solo (Lavallee *et al.*, 2020), ou seja, é aquela fração orgânica interagindo com a superfície das partículas minerais, formando os complexos organominerais. (Christensen, 1996).

O COAM é protegido da decomposição, através de proteção física, ficando ocluso dentro de microagregados (<250 µm), isso se faz possível por meio de sua associação aos minerais (argila) presentes no solo. Essa associação se dá através de ligações químicas entre a MOS e as superfícies minerais, tornando-a menos acessível aos agentes decompositores (Kleber *et al.*, 2015; Kögel-Knaber *et al.*, 2008; Totsche *et al.*, 2018). Tanto o COAM quanto COP podem conservar-se oclusos dentro de grandes agregados. Essa oclusão posterga a degradação, porém, em um grau menor que a associação aos minerais, que acontece somente com o COAM (Kögel-Knaber *et al.*, 2008; Poeplau *et al.*, 2018; Puget, Chenu & Balesdent, 2000; Schrumpf *et al.*, 2013).

O COP é mais sensível a mudanças no uso da terra como, por exemplo, o manejo adotado em plantios convencionais, promove a quebra dos agregados, que antes promoviam a proteção física dessa fração, e o aumento da taxa de decomposição -crobiana e, pela substituição de mata nativa em áreas de plantio convencionais que provocam o aumento imediato na sua taxa de decomposição COP (Lavallee *et al.*, 2020).

Num estudo realizado no município de Rio Verde e Montividiu, no sudoeste de Goiás, na região do Cerrado, Gazolla *et al.* (2015) observaram que as áreas de ILP possuíam maiores teores de COP e COAM nas camadas superficiais do solo (0 - 5 cm) sendo, 28,90 e 44,71 g kg⁻¹, respectivamente. O valor de COAM observado em ILP sobressaiu ao observado em Mata Nativa de Cerrado (CE). Já nas camadas mais profundas (10 – 20 e 20 – 40 cm) os resultados de COP E COAM nas áreas de ILP foram estatisticamente semelhantes aos observados para mata de Cerrado.

2.3 Estrutura do Solo em Sistemas Agrícolas Conservacionistas no Cerrado

O solo desempenha um papel de extrema importância por ser fundamental em diversos aspectos de vida na terra, pois atua regulando os ciclos dos nutrientes, sustenta a biodiversidade, produção de alimentos, sendo essencial para a segurança alimentar, atua na melhoria da qualidade da água e do ar e na diminuição da erosão (Sockmann *et al.*, 2015; Fujisaki *et al.*, 2018).

A estrutura do solo é um elemento essencial da qualidade física do solo por influenciar várias propriedades e processos do solo, como retenção de água, a aeração, permeabilidade, porosidade, decomposição e distribuição do material orgânico, fertilidade e a capacidade de suporte para o crescimento das plantas (Bottineli *et al.*, 2015; Rabot *et al.*, 2018).

Os agregados do solo são formados pela interação entre os agentes físicos, químicos e biológicos que atuam em conjunto com partículas minerais e orgânicas do solo. Esses agregados protegem fisicamente a MOS da mineralização ao diminuir a difusão de oxigênio no interior dos agregados e o acesso dos microrganismos e suas enzimas extracelulares produzidas à decomposição da matéria orgânica (Gelaw *et al.*, 2015; Spohn & Giani, 2010). O mecanismo de proteção física retarda a liberação de carbono na forma de CO₂ para a atmosfera, contribuindo com a manutenção dos estoques de carbono e nutrientes no solo (Fernandes *et al.*, 2017).

A estabilidade de agregados está associada com a presença dos principais agentes cimentantes, que variam dependendo das características do solo e das condições locais. Como principais agentes cimentantes destacam-se: MOS (polissacarídeos e húmus), óxidos de ferro e alumínio, carbonatos, cátions floculantes, argilominerais (Peng *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2016; Zhou & Song, 2004).

As ações antrópicas interferem significativamente no fluxo global de carbono, exemplo disso, é o preparo do solo com grades e arados, que acarretam na perda de carbono no solo pela quebra dos agregados e exposição da matéria orgânica a decomposição (Machado, 2005; Jantalia *et al.*, 2007; Loss *et al.*, 2009; Fabrizzi *et al.*, 2009; Pereira *et al.*, 2010, Boddey *et al.*, 2010; Costa Junior *et al.*, 2011).

As áreas como do bioma cerrado que sofrem queimadas naturais podem afetar a agregação do solo, através da eliminação do principal agente cimentante (MOS) (Thomaz, 2011; Chen & Shrestha, 2012), diminuindo o tamanho e a estabilidade dos agregados do solo (Rabbi *et al.*, 2015; Ribon *et al.*, 2014).

Falcão *et al.* (2020) em seus estudos sobre a agregação do solo em diferentes sistemas de manejo no município de Aquidauana (MS), observaram maiores valores de DMP nas áreas de (Mata Nativa e Pastagem Permanente), 4,54 e 4,31 mm, respectivamente.

Bocuti *et al.* (2018) em sua pesquisa realizada no Mato Grosso em solos de quatro microbacias localizadas nos municípios de Campo Verde e Santo Antônio de Leverger, observaram que os valores de DMP em mata nativa eram iguais à duas áreas de cultivo de milho e uma que estava em pousio, com 2,89, 2,48, 2,54 e 2,56 mm, respectivamente.

2.4 Estoques de Carbono e Nitrogênio nos Solos do Cerrado: Influência dos Sistemas de Manejo Agrícola

Os estoques de carbono e nitrogênio são utilizados como indicadores da sustentabilidade das produções agrícolas (Cerri, 2017). O solo possui um reservatório total de C no sistema terrestre (~2300 Pg), equivalente a 3,7 vezes os valores de C retido na vegetação (~610 Pg), e, aproximadamente a 3 vezes dos valores de C contido na atmosfera (~770 Pg) (Lal, 2002; Scharlemann *et al.*, 2014). Com isso, o estoque de carbono no solo atua no controle das funções ecosistêmicas (Raiesi, 2021) e um pequeno aumento nos estoques de C pode contribuir na mitigação das emissões de GEEs (Minasny *et al.*, 2017; Cotrufo, 2022).

Quando se adota um sistema de produção agrícola não apropriado, o carbono orgânico estocado pode ser perdido para a atmosfera na forma de CO₂ (Don; Schumacher; Freibauer, 2011; Franco *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2015; Souza; Prezotti & Guarçoni, 2012). Todavia, um manejo adequado, e com o necessário monitoramento ao longo do tempo para reforçar os efeitos no ecossistema (Souza *et al.*, 2020), pode ser uma estratégia para compensar as emissões de CO₂ e estocar C da atmosfera para o solo (Cerri, 2006).

A combustão de combustíveis fósseis é o principal causador do aumento do CO₂ na atmosfera com emissão de 6,3 Pg C (Schimel *et al.*, 2001; IPCC, 2001), porém, de acordo com o Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (IPCC) as atividades agrícolas também são uma das principais responsáveis pelas alterações na composição atmosférica provocados pela mudança no uso da terra (Lal 2004; Lal, 2014; Houghton 2014; Rosa *et al.*, 2014 LeQueré *et al.*, 2014 e 2015), e isso vai depender da principal atividade exercida em cada país, no caso do Brasil, maior parte da sua economia é oriunda de atividades agrícolas que corresponderam a 24,4% do PIB do País em 2023, podendo alcançar o total de R\$ 2,63 trilhões (CEPEA, 2023).

Os diferentes tipos de manejo agrícola possuem impacto direto nos estoques de carbono do solo (Costa *et al.*, 2009). Os sistemas de manejo que preconizam a conservação da MOS resultam em maiores estoques de carbono e nitrogênio, sendo benéfico tanto para a produtividade agrícola, já que o C também está ligado à fertilidade do solo, quanto para a mitigação das mudanças climáticas (Cotrufo *et al.*, 2022).

A escolha da prática de manejo agrícola é fundamental para a manutenção e melhoria da qualidade do solo (Freitas *et al.*, 2018), pois sem a fertilidade natural, normalmente é inserido insumos químicos de fontes não renováveis que acabam acarretando na degradação do solo

(Mutegi *et al.* 2013). Souza *et al.* (2023), em seu trabalho sobre o impacto dos estoques de C e N ao longo de 24 anos (1995 – 2019), concluiu que a conversão de floresta nativa secundária para o pasto marandu (*Urochloa Brizantha*) com a adição de fertilizante nitrogenado (24 anos de cultivo), capim elefante (*Pennisetum purpureum*) com adição de fertilizante nitrogenado (cultivado por 8 anos) e substituído por pastagem mista de marandu (*U. Brizantha*) com amendoeiro forrageiro (cultivado por 16 anos), o estoque de C nas camadas 0-30 cm tiveram um aumento de 13,8 e 13,6 Mg C ha⁻¹, respectivamente.

Damian *et al.* (2020), através do uso do modelo DayCent, que é utilizado para simular os efeitos da conversão de pastagens mal manejadas em sistemas de cultivo mais sustentáveis, observou que a conversão de pastagem mal manejada em pastagem adubada (clima tropical úmido), integração lavoura-pecuária (clima tropical úmido e subtropical) e integração pecuária-floresta (condição mésica tropical), proporcionou um aumento nos estoques de C no solo em 0,95, 0,70, 0,04 e 0,16 Mg ha ano⁻¹, respectivamente, sendo maiores até que os estoques da mata nativa utilizada como referência.

As mudanças nos estoques de C do solo também interferem nas alterações dos conteúdos de N, pois os dois, juntamente com os nutrientes do solo podem colaborar na orientação de estratégias de manejo de recuperação dos agroecossistemas (Iwata, 2010).

2.4.1 Os Sistemas Integrados de Produção Agrícola

Há a necessidade de adoção de tecnologias sustentáveis que reduzam os riscos causados pelas atividades agropecuárias e que, consequentemente, possibilitem melhorias nos valores dos produtos fornecidos (Gotijo Neto *et al.*, 2014).

Os sistemas integrados de produção são sistemas que tem como objetivo melhorar a eficiência da produção agrícola, reduzir os custos e minimizar desperdícios promovendo uma abordagem holística da produção (Balbino *et al.*, 2011; Balbino *et al.*, 2019). Os sistemas podem ser classificados em quatro grandes grupos: (i) integração lavoura-pecuária (ILP) ou agropastoril; (ii) integração pecuária-floresta (IPF) ou silvipastoril; (iii) integração lavoura-floresta (ILF) ou silviagrícola; (iv) integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) ou agrossilvipastoril (Balbino *et al.* (2011).

São inúmeros os benefícios sociais, econômicos e ambientais encontrados nos sistemas integrados, sendo os principais: melhoria e conservação da qualidade do solo e da água; preservação da biodiversidade e de serviços ambientais; redução da contaminação do ambiente e do homem; quebra no ciclo de doenças, insetos-pragas e plantas daninhas; redução das atividades antrópicas; aumento da renda e qualidade de vida do produtor; recuperação de pastagens degradadas (Balbino *et al.*, 2019; Cordeiro *et al.*, 2015; Kichel *et al.*, 2014; Osório; Azevedo, 2014; Silva *et al.*, 2014); sequestro de carbono e (Nicodemo *et al.*, 2019), consequentemente, a mitigação das emissões de GEEs (Assad *et al.*, 2019).

Um dos principais benefícios é o alto teor de matéria orgânica na superfície do solo, por serem práticas de manejo que conservam o solo, enquanto em sistemas convencionais pode ocorrer a perda da MOS, o que compromete a qualidade do solo (Assad *et al.*, 2019; Bungenstab *et al.*, 2019). Logo, o uso de sistemas integrados de produção pode aumentar o teor de C nas frações humificadas, o que contribui nos atributos físicos e químicos do solo (Silva *et al.*, 2011; Vicente *et al.*, 2019).

A ILP é um método estratégico de produção agropecuária que tem por objetivo integrar as atividades agrícola com a pecuária na mesma área, sendo de modo consorciado, em sucessão ou rotação, em um mesmo ano ou em vários (Balbino *et al.*, 2011, Vilela *et al.*, 2011, Kluthcouski *et al.*, 2015), onde os produtos podem ser destinados para o consumo humano ou animal (Macedo *et al.*, 2012). Tem por objetivo melhorar a sustentabilidade, a produtividade, a

rentabilidade das atividades agropecuárias e compensar as emissões de GEEs advindos de atividades agropecuárias (Oliveira *et al.*, 2017).

Em um levantamento realizado entre 2016 e 2018, no Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento da Universidade Federal de Goiás (LAPIG/UFG), nas áreas de contrato do Plano ABC (Plano Agricultura de Baixa Emissão de Carbono), foi estimado que houve redução de áreas de pastagens degradadas de 34,3% para 25,2%, com progresso na qualidade da pastagem em 30,3% das áreas analisadas (Júnior *et al.*, 2020).

Por isso, destaca-se a importância da seletividade do capim que será utilizado na implantação do ILP, para que garanta a qualidade da forragem, que tenha alta produtividade, que mantenha a sustentabilidade e que haja melhorias na criação do gado, pois o cultivo de gramíneas em sistemas integrados beneficia o teor de MOS por possuírem sistemas radiculares mais densos e pela elevada taxa de renovação radicular (Araújo *et al.*, 2020). Nesse contexto, destaca-se a *Panicum maximum* Jacq. cv. Miyagi, uma das espécies mais utilizadas do gênero *Panicum* nos sistemas de produção de pasto no Cerrado, por apresentarem excelente valor nutricional, alta capacidade de produção e pela rápida adaptação em diferentes condições de solo e clima.

2.4.2 Sistemas integrados com a introdução de *Miyagi*

A cultivar cv. Miyagi está ligado à família *Poaceae*, subfamília *Panicoideae* e tribo *Paniceae*. São consideradas gramíneas forrageiras tropicais, perenes e de ciclo fotossintético C4 (Da Fonseca & Martuscello, 2010; Tavares, 2019).

O capim *Miyagi* foi coletado pela primeira vez em 2009, em uma área da Fazenda Fortaleza, em Valparaiso – SP e foi melhorada, individualmente, por meio de seleção dos indivíduos que apresentavam as características desejáveis, tais como: elevada produção de forragem, folhas largas e compridas, alta produção de sementes e panícula mais fechada (Tavares, 2019).

Em 2017, foi registrada pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), pela Associação Nacional dos Produtores de Sementes de Gramíneas e Leguminosas Forrageiras, como um Capim-colonião (*Megathyrsus maximus* (Jacq.) B. K. Simon & S. W. L. Jacobs = *Panicum maximum* Jacq.), só que apresentando melhoramento genético (MAPA, 2017).

Sabe-se que o capim *Miyagi*, assemelha-se com o capim Mombaça a respeito da estrutura do dossel e composição bromatológica (Tavares, 2019). Mas, estudos recentes mostram que o *Miyagi* é superior em relação ao Mombaça, quando manejado tanto na altura de saída de 30 cm quanto na de 50 cm, sendo a entrada para ambas na altura do dossel em 77 cm (Grupo Esperança Rural, 2021).

Essa forrageira exige de média a alta fertilidade do solo, crescimento ereto, de tipo cespitoso, formando uma touceira. Suas folhas podem atingir 120 cm de comprimento e 5 cm de largura e possui altura média de 1,60 m até 2,50 m. Produz, aproximadamente, entre 25 a 30 t/ha/ano, com proteína bruta de 8 a 14% na massa seca (MS), é utilizado tanto para pastejo direto quanto para silagem e rotação, permite consórcio com todas as leguminosas e pode ser utilizado tanto para gado de leite quanto de corte (Grupo Esperança Rural, 2021).

Assim como todas as forrageiras, ela também apresenta algumas limitações, tais como: profundidade de plantio entre 1,0 e 2,0 cm; média tolerância a seca, baixa tolerância a frio e solos úmidos e a exigência de precipitação pluviométrica acima de 950 mm anuais (Grupo Esperança Rural, 2021).

Por ser semelhante ao Mombaça, Cruz (2016), em seus estudos durante dois anos comparando a produtividade de um sistema integrado com o cultivo convencional, observou que a proteína bruta apresentou aumento de MS de 12% para 14,5% em sistemas integrados de produção, logo, o capim *Miyagi* também apresentará características favoráveis para uso em

sistemas integrados. Logo, constata-se que *Panicum maximum* Jacq. cv. *Miyagui* pode ser utilizada como uma importante opção para contribuir no aperfeiçoamento do setor agropecuário brasileiro atuando na melhoria das pastagens do Brasil.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e Caracterização Edafo-Climáticas da Área de Estudo

O estudo foi conduzido em uma propriedade localizada na cidade de Unaí, que pertence a mesorregião do Noroeste do Estado de Minas Gerais, inserida no bioma Cerrado, com coordenadas geográficas $16^{\circ} 22' 45''$ de latitude sul e $46^{\circ} 53' 45''$ de longitude oeste. O clima da região é caracterizado como Tropical de Savana (Aw), segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual em torno de 22°C a 27°C , em maior parte do bioma e precipitação média anual entre de 1.200 mm a 1.400 mm.

O solo da área de estudo foi classificado como Latossolo Vermelho, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018).

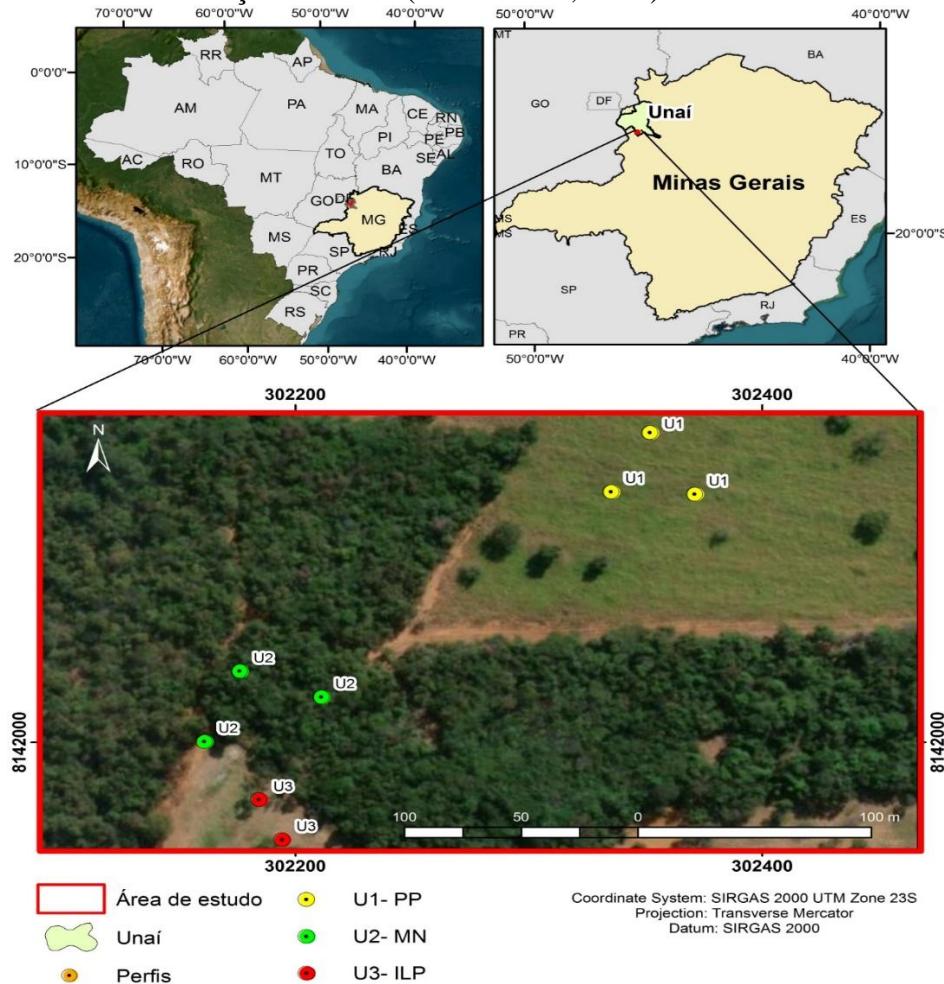


Figura 1. Localização da área de estudo com a identificação dos perfis de solo abertos em cada tratamento avaliado. PP: Pasto produtivo; MN: Mata nativa; ILP: Integração lavoura-pecuária.

3.2 Histórico da Área de Estudo

A área de estudo possui um histórico de monitoramento de uso e manejo do solo há 14 anos. As coletas foram realizadas nos dias 11 e 12 de agosto de 2022, período em que as temperaturas médias variam de 29 a 31°C na região e, na época, o local passava por uma longa estiagem desde abril do mesmo ano. Os tratamentos avaliados foram: i) Mata Nativa (MN); ii) Pasto Produtivo (PP) e iii) Integração lavoura-pecuária (ILP).

Tabela 1. Detalhamento dos tratamentos avaliados com o histórico de uso da terra.

Sistema de uso	Histórico da área
MN	Área de vegetação natural do Cerrado, caracterizada como Cerrado denso.
PP	Área cultivada há 6 anos com capim <i>Miyagui</i> (<i>Panicum maximum</i> cv <i>Miyagui</i>). Antes da implantação da gramínea, havia plantio de cana-de-açúcar há 12 anos (<i>Saccharum officinarum</i> L.). É realizado o manejo da fertilidade do solo anualmente, não há uso de implementos agrícolas e o pasto é renovado a cada 3 anos
ILP	Área cultivada há 4 anos com milho (<i>Zea mays</i>) em integração com capim <i>Miyagui</i> (<i>Panicum maximum</i> cv <i>Miyagui</i>), em sistema semi-intensivo. Antes da instalação da ILP, a área era coberta por um campo sujo de Cerrado. É realizada a avaliação da fertilidade do solo, anualmente, e não há uso de implementos agrícolas.



Figura 2. Tratamentos avaliados: A) área sob vegetação nativa no bioma Cerrado (cerrado denso); B) área de pasto produtivo com capim *Miyagui* (*Panicum maximum* cv *Miyagui*) e C) área de Integração lavoura-pecuária há 4 anos.

3.3 Coleta das amostras de terra deformadas e indeformadas

O monitoramento do carbono no solo seguiu as premissas do Protocolo de Medição, Relato e Verificação (MRV), recomendada pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura (FAO, 2020).

Para a amostragem de terra deformada e indeformada utilizadas para determinar a os teores de C e N e a densidade do solo, respectivamente, foram abertas trincheiras com 100 cm (profundidade) x 1,2 (largura) x 1,5 m (comprimento). As amostras de terra foram coletadas nas quatro paredes do perfil, nas seguintes profundidades: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. As quatro amostras de terra deformadas, coletadas em cada profundidade, formaram uma amostra composta. Já para densidade do solo, foram coletadas nas mesmas profundidades em apenas uma parede do perfil, sempre da camada mais inferior para a superior. Foram realizadas três repetições (trincheiras) para cada cobertura vegetal analisada.

Após a abertura das trincheiras foi realizada a limpeza da superfície e da parede do perfil. Posteriormente, foi feita a coleta de amostras indeformadas de terra utilizando anéis de Kopecky (anéis com volume conhecido de 88,3125 cm³), que foram inseridos em cada profundidade avaliada do perfil do solo, de forma cuidadosa com o auxílio do martelo pedológico. Ainda no campo e, na mesma trincheira, foi realizada a coleta da amostra deformada de terra. Foram coletadas, aproximadamente, 2 kg de terra em cada profundidade citada, de baixo para cima para não contaminar as amostras. Todo o conteúdo da amostra de terra foi transferido para sacos plásticos, previamente identificados com etiquetas contendo as seguintes informações: município, a fazenda, as coordenadas geográficas, tipo de amostra, profundidade e a data da coleta.

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 execução das análises físicas e químicas de solo.



Figura 3. Coleta de amostras indeformadas de terra (A e B).

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

As amostras 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 de TFSA, foi realizada a análise granulométrica, seguindo a metodologia da Embrapa (2017). Para as análises químicas, foram feitos os teores de alumínio, acidez potencial, 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).

Posteriormente, foram realizadas análises físicas de densidade do solo, onde todo o conteúdo de terra contido no anel volumétrico foi transferido para cadiinhos de alumínio, previamente pesados e colocados em estufa à 105°C, por 24h. Após esse período, os cadiinhos foram retirados e colocados em dessecadores e depois pesados para a obtenção da massa seca de solo. A densidade do solo foi calculada segundo a equação:

$$D_s = \frac{M_s}{V}$$

M_s = massa seca de solo à 105 °C, 24 h;

V = volume total, correspondente ao volume do anel.

3.4 Teores e estoques de carbono e nitrogênio no solo

Foram realizadas análises dos teores de nitrogênio e carbono total nas amostras de terra coletadas até 100 cm de profundidade, segundo a metodologia de Nelson & Sommer (1996). As amostras de TFSA foram finamente moídas até atingir granulometria de 100 *mesh* (0,149 mm) e analisadas, via combustão seca, no analisador automático de carbono, hidrogênio e nitrogênio (CHN).

A partir dos resultados obtidos nas análises dos teores de C e N, assim como, os resultados obtidos para a densidade do solo, foram calculados os estoques de C e N em 10 cm, 30 cm e 100 cm de profundidade. 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 matemática:

$$Cs = \sum_{i=1}^{n-1} C_{Ti} + \left[M_{Tn} - \left(\sum_{i=0}^n M_{Ti} - \sum_{i=0}^n M_{Si} \right) \right] C_{Tn}$$

Cs = Estoque de carbono ($Mg\ C\ ha^{-1}$)

C_{Ti} = Soma do conteúdo total de C da camada 1 (superfície) à camada $n-1$ (penúltima) do perfil correspondente ao tratamento.

M_{Tn} = massa do solo na última camada do perfil do tratamento

M_{Ti} = soma da massa do solo ($Mg\ ha^{-1}$) da camada 1 à camada n (maior profundidade) do perfil do tratamento.

M_{Si} = soma da massa de solo da camada 1 à camada n (maior profundidade) no perfil de referência.

C_{Tn} = concentração de carbono ($Mg\ de\ C\ Mg\ de\ solo$) na camada mais profunda no perfil de tratamento.

3.5 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo

O fracionamento físico de matéria orgânica do solo foi realizado através da metodologia proposta por Cambardella & Elliot (1992), nas seguintes profundidades: 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm. Primeiramente, foram transferidos 10 g de TFSA, em tubos *falcon*, e adicionados 30 mL da solução de hexametafosfato de sódio ($5g\ L^{-1}$). A seguir, as amostras foram agitadas por 15 horas em um agitador horizontal e, em seguida, todo o conteúdo contido no tubo lavado por inúmeras vezes com água destilada e tamisado em uma peneira de abertura de classe de 53 μm . 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 lável), por 72 h. Após a secagem, a amostra foi finamente moída no moinho de rolagem (Smith &

Myung, 1990) e passadas em peneira de 100 *mesh* (0,149 mm) para a determinação dos teores de C e N nessa fração (COP). O material que passou através da peneira de 53 μm , corresponde à matéria orgânica associada aos minerais (MOAM) e o carbono orgânico solúvel em água. O C e o N da MOAM foram calculados pela diferença entre os teores de C e N total do solo e os teores de C e N na fração do COP.

3.6 Estabilidade dos agregados do solo

Na mesma trincheira aberta para a amostragem de terra deformada e indeformada, foram retiradas amostras indeformadas para a avaliação da estabilidade dos agregados do solo. Foi utilizado uma pá de pedreiro, de forma cuidadosa, nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. As amostras de terra foram colocadas em sacos plásticos devidamente identificados e, armazenados em caixotes de madeira e levadas até o laboratório de Matéria Orgânica do Solo, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ. As amostras de terra foram secas ao ar na sombra até alcançarem de 10 a 15% de umidade. Os solos úmidos foram gentilmente quebrados nos pontos de quebra naturais e passados por peneiras de 8 mm e 4 mm, respectivamente.

3.6.1 Separação dos agregados estáveis em água por tamanho

A separação dos agregados em água foi realizada de acordo com o método descrito por Kemper & Chepil (1965), que utiliza o aparelho de oscilação vertical *Yooder* (1936). Esse método simula o comportamento dos agregados no campo durante uma chuva.

Nesse método, cada conjunto de tamises do *Yooder* usado foi constituída por peneiras com malhas de 2,0, 1,0, 0,5, 0,25 e 0,105 mm de diâmetro. Para a análise dos agregados, foi realizado um pré-tratamento umedecendo as amostras por meio de um atomizador. O conjunto de tamises foi regulado de forma que a lâmina d'água atingisse a parte superior da amostra contida na peneira de maior diâmetro. A tamissagem foi realizada por 15 minutos.

Posteriormente, foi quantificado a proporção de solo contida em cada peneira, por meio da secagem do material de solo retido em estufa, à temperatura de 60°C, de modo a não haver perda do C e N lábil, por no mínimo 24h. Foi calculado, através da diferença, o que ultrapassou a última peneira (< 0,105 mm).

Para obter o estado de agregação do solo, foi calculado o índice de agregação que caracteriza a sua estatura e disposição que compõem o solo, sendo ele: Diâmetro Médio Ponderado (DMP) de acordo com Kemper & Rosenau (1986), utilizando-se a seguinte equação:

$$\text{DMP} = \sum_i^n -1 x_i w_i$$

w_i = proporção de cada classe de agregados em relação ao total;

x_i = diâmetro médio de cada classe de agregados.

3.7 Análise estatística

Todas as análises estatísticas foram geradas através do programa estatístico R versão 4.3.0 (2023-04-21 ucrt). A análise estatística foi realizada por meio do delineamento inteiramente casualizado (DIC) com três tratamentos e três repetições. Nas análises foi realizado a análise de variância (ANOVA) e o teste de comparação de médias pelo teste de Tukey à 5% de significância para as variáveis cujo teste t foi significativo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise química do solo

Os resultados da análise química do solo estão sendo representados na Tabela 2. Na área de MN, o pH do solo variou entre 4,73 e 5,1, caracterizando um solo ácido, típico do Cerrado. Essa acidez ocorre devido à lixiviação de bases no solo, como: Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Potássio (K), e ao acúmulo natural de alumínio (Al^{3+}), que variou entre 0,70 e 1,46 $Cmol_c\ dm^{-3}$.

Nas áreas de PP e ILP, onde a fertilidade do solo é avaliada periodicamente para a reação da adubação e calagem, o pH na camada superficial foi de 5,21 no PP e 6,32 no ILP. Isso mostra que, embora a área de PP receba calagem, a correção da acidez do solo ainda não foi completa, enquanto no ILP houve uma neutralização mais eficiente da acidez. Isso é justificado também nos teores de alumínio, onde no PP, os teores de Al^{3+} foram mais elevados, com 0,67 $Cmol_c\ dm^{-3}$ na camada superficial, mostrando que a calagem foi insuficiente para neutralizar o alumínio. Já no ILP, o valor de Al^{3+} foi nulo nas camadas superficiais, demonstrando eficiência na correção do solo.

Os teores de macronutrientes Ca e Mg foram baixos na MN, com variação de Ca de 0,00 a 0,67 $Cmol_c\ dm^{-3}$ e Mg de 1,73 a 0,51 $Cmol_c\ dm^{-3}$, devido à acidez do solo e à ausência de adubação, pois esses dois parâmetros são disponibilizados pela calagem.

No PP, embora os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} tenham sido altos, os valores estão abaixo da relação Ca/Mg ideal que varia de 3:1 a 5:1, indicando excesso de magnésio em relação ao cálcio, logo, recomenda-se a aplicação de calcário calcítico que tem maior proporção de Ca. Além disso, a presença de alumínio residual indica que a calagem não foi bem manejada.

Por outro lado, na ILP houve o controle da acidez tóxica, do pH do solo e os teores dos macronutrientes bem elevados (acima de 2 $Cmol_c\ kg^{-1}$ solo) na camada superficial do solo (0-5 e 5-10 cm), logo foi o sistema que apresentou os resultados mais favoráveis.

Tabela 2. Análise química do solo sob mata nativa, pasto produtivo e integração lavoura-pecuária em Unaí (MG).

Cobertura Vegetal	Profundidade (cm)	pH (H ₂ O)	Al ³⁺	Ca ²⁺ (Cmol _c dm ⁻³)	Mg ²⁺
MN	0-5	5,00	0,91	0,36	1,73
	5-10	4,75	1,25	0,67	1,02
	10-20	4,75	1,46	0,10	0,70
	20-30	4,77	1,36	0,19	0,76
	30-40	4,82	1,31	0,10	0,64
	40-60	4,73	1,31	0,10	0,77
	60-80	4,75	0,97	0,10	0,51
	80-100	5,01	0,70	0,00	0,80
PP	0-5	5,21	0,67	2,72	2,98
	5-10	5,21	1,01	2,26	2,93
	10-20	5,15	1,16	2,11	2,05
	20-30	4,90	1,52	0,92	1,66
	30-40	4,82	1,76	0,41	1,37
	40-60	4,69	1,67	0,38	1,25
	60-80	4,80	1,28	0,51	1,12
	80-100	4,83	1,37	0,19	1,41
ILP	0-5	6,32	0,00	6,64	2,76
	5-10	6,02	0,00	3,89	2,36
	10-20	4,74	1,31	1,37	1,31

20-30	4,60	1,57	1,02	1,30
30-40	4,85	1,53	0,29	0,92
40-60	4,96	1,47	0,16	0,60
60-80	5,09	1,15	0,03	0,60
80-100	5,12	0,82	0,00	0,57

4.2 Análises físicas do solo

4.2.1 Análise granulométrica do solo

Os resultados da textura do solo, obtidos na análise granulométrica do solo, estão apresentados na Tabela 3. Pode-se observar que a textura foi semelhante nas áreas sob MN, PP e ILP para todas as profundidades avaliadas, apresentando a classe textural muito argilosa ($> 60\%$ de argila). Esse resultado é importante na comparação dos estoques de C e N no solo pois, parte-se da premissa que os tratamentos a serem comparados devem possuir a mesma classe textural do solo.

Tabela 3. Análise granulométrica do solo sob mata nativa, pasto produtivo e integração lavoura-pecuária em Unaí (MG).

Cobertura do solo	Profundidade (cm)	Areia	Argila	Silte
			(g kg ⁻¹)	
MN	0-5	151	608	241
	5-10	150	625	225
	10-20	136	608	256
	20-30	165	639	196
	30-40	136	642	222
	40-60	109	614	277
	60-80	98	648	254
	80-100	120	649	231
PP	0-5	137	650	213
	5-10	125	644	231
	10-20	127	691	182
	20-30	109	677	214
	30-40	103	679	218
	40-60	105	645	250
	60-80	101	689	210
	80-100	104	673	223
ILP	0-5	147	600	253
	5-10	133	617	250
	10-20	135	644	221
	20-30	122	635	243
	30-40	117	640	183
	40-60	100	648	252
	60-80	128	639	233
	80-100	102	658	240

4.2.2 Densidade do solo

Os valores de densidade do solo variaram de 0,90 a 1,36 Mg m⁻³ na área sob MN e nos diferentes sistemas de manejos do solo, conforme representado na Figura 4. Não foi observada diferença estatisticamente significativa na densidade do solo entre a MN e os diferentes sistemas de manejos nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm. No entanto, a partir da camada 30-40 cm, a MN apresentou diferença estatística significativa em relação aos demais sistemas, que registraram maiores valores de densidade do solo em comparação à MN.

O PP e a ILP, mesmo apresentando valores de densidade do solo mais elevados, eles permanecem dentro do limite aceitável para a textura do solo, sendo 1,45 Mg m⁻³ o valor máximo para não causar restrições ao crescimento radicular das culturas (Reinert, 2006).

Na MN, esses valores mais baixos são explicados pela presença de vegetação natural, contribuindo para a entrada de matéria orgânica no solo e a ausência de perturbação do solo que contribui para uma estrutura mais estável e com maior porosidade, reduzindo a compactação. No PP e ILP, os reduzidos valores de densidade do solo podem ser explicados pelo não uso de máquinas agrícolas, a renovação da pastagem ser realizada a cada 3 anos, pelo controle da taxa de lotação animal e devido ao aporte de matéria orgânica na superfície do solo, via ligeira, pela reabrota da gramínea e na subsuperfície, via intenso sistema radicular dessa cultura.

A retirada de MN de Cerrado para a agricultura com a adoção de sistemas integrados (ILP) ou para a pecuária com sistema produtivo de produção não altera a porosidade do solo na camada superficial do solo (0-30 cm). Por outro lado, após 30 cm de profundidade há um aumento da DS, que deve ser acompanhado ao longo dos anos.

Tabela 4. Densidade do solo (Mg m⁻³) sob Mata Nativa de Cerrado, Pastagem Produtiva e Integração Lavoura-pecuária, em Unaí (MG).

Profundidades (cm)	MN	PP	ILP
0-5	0,96 a	0,90 a	0,95 a
5-10	0,91 a	0,90 a	0,93 a
10-20	0,90 a	0,94 a	0,93 a
20-30	0,93 a	0,95 a	1,01 a
30-40	0,97 b	1,00 a	1,01 a
40-60	0,96 b	1,05 a	1,11 a
60-80	0,99 b	1,22 a	1,24 a
80-100	1,12 b	1,22 a	1,36 a

*Médias de mesma letra, nas linhas, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância (P<0,05).

4.2.3 Teores de carbono e nitrogênio total no solo

Os teores de carbono e nitrogênio total no solo estão apresentados nas Tabelas 5 e 6. Considerando os teores de C no solo, a conversão de MN para PP aumentou os teores nas profundidades de 0-5, 10-20, 20-30, 40-60, 60-80 e 80-100. Ou seja, a retirada da MN para a implantação da PP manteve e/ou aumentou os teores de C no solo em todas essas profundidades. Os teores de C reduziram somente nas profundidades de 5-10 e 30-40 cm, logo, no geral, esse sistema se mostra eficiente na manutenção e incremento de matéria orgânica, devido ao baixo revolvimento do solo e ao aporte contínuo de raízes e folhas da gramínea.

No sistema ILP, a retirada da MN acarretou redução nos teores de C no solo nas profundidades de 5-10, 40-60, 60-80 e 80-100, sendo praticamente nas mesmas profundidades em que houve um aumento da densidade do solo. Isso demonstra a importância da MOS na promoção da agregação do solo e, consequentemente, na porosidade do solo. A ILP foi implantada há 4

anos em um local onde anteriormente era apenas um pasto sujo de cerrado, ou seja, esse sistema ainda está em fase inicial de implantação.

Dessa forma, destaca-se a importância dos sistemas de manejo com pastagens produtivas, bem manejadas, e sua relação com os teores de carbono no solo. Esse fato também foi observado por Falcão (2020), onde observou um maior teor de C ($36,29 \text{ g kg}^{-1}$) em áreas de pastagens permanentes em relação à MN, em uma pesquisa realizada em uma fazenda experimental da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, no município de Aquidauana (MS). Braz *et al.* (2013) também observou o mesmo comportamento com um experimento com pastagens bem manejadas em relação à mata nativa no Cerrado.

Tanto para os teores de C quanto para os de N no solo, observa-se uma diminuição dos mesmos em profundidade e, um posterior aumento nas camadas de 30-40 e 40-60 cm para todas as áreas analisadas. Esse comportamento pode estar associado ao histórico do uso do solo, com possível entrada de fogo para o desbravamento das áreas no passado, o que pode ser corroborado com a elevada relação C/N do solo nessas mesmas profundidades (Tabela 7). Essa alta razão C/N pode indicar presença de carvão no solo, comportamento muito comum nos solos do Cerrado.

Tabela 5. Teores de C (g kg^{-1} de solo) sob Mata Nativa (MN) de Cerrado, Pastagem Produtiva (PP) e Integração lavoura-pecuária (ILP), em Unaí (MG).

Profundidades (cm)	MN	PP	ILP
0-5	12,47 b	31,73 a	13,43 b
5-10	28,23 a	19,47 b	9,60 c
10-20	5,43 b	16,77 a	2,80 b
20-30	4,70 b	8,13 a	2,77 b
30-40	24,50 a	20,87 b	24,40 a
40-60	13,33 b	16,30 a	5,07 c
60-80	7,27 a	8,57 a	4,30 b
80-100	4,03 a	5,27 a	2,96 b

** Médias de mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($P<0,05$).

Para os teores de N no solo, observa-se que a retirada da MN para a PP manteve ou aumentou os teores de N ao longo do perfil do solo, exceto na profundidade de 5-10 e 30-40 cm. O mesmo não é verdadeiro quando se considera o tratamento ILP, pois nas profundidades 5-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-60cm a retirada da mata para a entrada de ILP reduziu os teores de N no solo.

Cabe destacar que abaixo de 60 cm de profundidade não houve diferença estatística significativa nos teores de N no solo entre os tratamentos avaliados, conforme observado na Tabela 6., mostrando que o N é menos influenciado pelo manejo do solo nessas camadas mais profundas.

O sistema ILP teve os menores teores de nitrogênio na maioria das camadas, principalmente, nas profundidades intermediárias. Isso se deve ao sistema ILP ainda estar em fase de estabilização, uma vez que foi implantado há apenas quatro anos.

Tabela 6. Teores de N (g kg^{-1} de solo) sob Mata Nativa de Cerrado, Pastagem Produtiva, e Integração lavoura-pecuária, em Unaí (MG).

Profundidades (cm)	MN	PP	ILP
0-5	0,73 b	1,5 a	0,93 b
5-10	1,60 a	0,86 b	0,67 b
10-20	0,37 b	0,70 a	0,17 c
20-30	0,37 a	0,50 a	0,17 c

30-40	1,53 a	1,00 b	1,17 b
40-60	0,77 a	0,70 a	0,27 b
60-80	0,43 a	0,47 a	0,33 a
80-100	0,37 a	0,37 a	0,23 a

** Médias de mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($P<0,05$).

Na Tabela 7 estão apresentados a relação carbono/nitrogênio no solo nas áreas de MN, PP e ILP. Observou-se que na maioria das profundidades a relação C/N foi alta e diversos estudos têm chamado a atenção para valores elevados da relação C/N nos solos do Cerrado, devido aos incêndios naturais que ocorrem nesse bioma e pelas frequentes queimadas ocasionadas pelo homem que vem ocorrendo ao longo de décadas para conversão de mata nativa em áreas agricultáveis (Braz *et al.*, 2013; Jantalia, 2007), com isso há a diminuição nos valores de N. Este fato é um indicativo que uma grande proporção do C do solo se encontra na forma inerte como carvão (Jantalia, 2007).

Tabela 7. Relação C/N do solo sob Mata Nativa de Cerrado, Pastagem Produtiva, e Integração lavoura-pecuária, em Unaí (MG).

Profundidades (cm)	MN	PP	ILP
0-5	22	16	11
5-10	20	25	15
10-20	19	16	21
20-30	15	16	16
30-40	18	22	26
40-60	17	30	26
60-80	21	23	8
80-100	10	14	13

4.2.4 Estoques de C e N no solo

Após estimar os teores de carbono e nitrogênio totais nos diferentes tipos de manejo adotados e na MN, foram calculados os estoques de C e N. Os maiores estoques de C em todas as camadas analisadas (0-10, 0-30 e 0-100 cm), foram observados nas áreas de PP com valores de 33,08, 68,93 e 130,47 Mg ha⁻¹, respectivamente (Tabela 8). Em todas as camadas, o PP diferiu estatisticamente dos demais tratamentos, sendo mais elevado, inclusive, que a MN. Esse fato também foi observado por Braz *et al.* (2013) ao comparar os estoques de C do solo, sob vegetação nativa do Cerrado, Pastagem Produtiva e Pasto degradado em quatro diferentes regiões inseridas no bioma Cerrado, localizados nos Estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais e São Paulo.

Isso pode ser explicado devido à adição de carbono novo via a intensa rebrota das gramineas e da entrada de matéria orgânica pelas raízes que podem atingir profundidades de até 1m, quando bem manejadas. O controle da taxa de lotação animal nas pastagens, que possibilitam um armazenamento de C dentro dos agregados do solo, podem resultar em estoques de C semelhantes ou até maiores aos encontrados na vegetação nativa (Braz *et al.*, 2013; Oliveira e Corsi, 2005; Silva *et al.*, 2011). Além disso, a textura do solo na área experimental, muito argilosa, pode ajudar na preservação do C. Isso se deve ao importante papel empregado pela argila que atua na proteção química do C, através da interação química com a matéria orgânica do solo, formando complexos organo-mineral (Braz *et al.*, 2013; Silva; Mendonça 2007; Costa Jr. *et al.*, 2011).

A ILP apresentou menores estoques de C e N quando considera os primeiros 100 cm de profundidade. Quando se considera a camada superficial (0-10 cm), a ILP foi superior a MN e, na subsuperficial (0-30 cm) não difere da MN. Mas, espera-se que com o passar dos anos ocorra os aumentos nos estoques de C, N e, consequentemente, da qualidade do solo. Isso pode ser atingido com o manejo sustentável do solo, devido ao teor de argila, se continuarem com o não revolvimento do solo antes do plantio e se adotarem a incorporação de plantas de cobertura e adubação verde (Bayer *et al.*, 2006; Boddey *et al.*, 2010; Conceição *et al.*, 2013; Sá *et al.*, 2014; Corbeels *et al.* 2016).

As pastagens bem manejadas podem ter altos estoques de carbono no solo devido ao aporte contínuo de matéria orgânica, raízes profundas e manejo adequado. No entanto, isso não significa que sejam um ecossistema melhor que a mata nativa, pois as florestas armazem carbono em maior quantidade e por mais tempo, além de oferecerem benefícios como regulação do ciclo hídrico, conservação do solo, maior biodiversidade e resiliência ecológica. O ideal é equilibrar a produção agropecuária com a preservação da vegetação nativa, usando práticas de manejo do solo sustentáveis.

Tabela 8. Estoques de C ($Mg\ C\ ha^{-1}$) no solo sob Mata Nativa de Cerrado, Pastagem Produtiva e Integração lavoura-pecuária, em Unaí (MG).

Camadas (cm)	MN	PP ($Mg\ C\ ha^{-1}$)	ILP
0-10	11,42 c	33,08 a	15,41 b
0-30	41,77 b	68,93a	23,11b
0-100	100,07 b	130,47 a	66,43 c

* Médias de mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($P<0,05$).

Para o estoque de nitrogênio (Tabela 9), observou-se que ele seguiu o mesmo comportamento do estoque de C, onde os estoques foram maiores nas áreas de PP, exceto nas camadas de 0-30 e 0-100 cm, ao qual se igualou a mata nativa.

Tabela 9. Estoques de N ($Mg\ N\ ha^{-1}$) no solo sob Mata Nativa de Cerrado, Pastagem Produtiva e Integração lavoura-pecuária, em Unaí (MG).

Camadas (cm)	MN	PP ($Mg\ N\ ha^{-1}$)	ILP
0-10	0,70 c	1,48 a	1,06 b
0-30	2,60 a	3,22 a	1,53 b
0-100	6,02 a	6,37 a	3,97 b

** Médias de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($P<0,05$).

Considerando a camada de 1m de profundidade do solo, a retirada da MN para a entrada de ILP acarretou numa redução de, aproximadamente, 35% dos estoques de N no solo. Como é necessário ter N no sistema para fixarmos C, essa redução nos estoques de N também teve como consequência uma redução de 44% nos estoques de C no SAF, nessa mesma camada.

Considerando os sistemas de manejo do solo, a PP foi sistematicamente maior que a ILP em todas as camadas avaliadas. Os incrementos de N no solo foram mais substanciais quando se considera as camadas de 0-30 e 0-100 cm. Isso pode estar associado a pastagem bem manejada incorporando matéria orgânica via raízes em profundidade.

4.3 Fracionamento Físico da MOS

4.3.1 Carbono orgânico particulado

Diante dos resultados obtidos que estão descritos na Tabela 10, observa-se que, a MN proporcionou maior entrada de COP na camada superficial do solo (0-5 cm). Esses maiores aportes na camada de 0-5 cm do solo estão relacionados a maior entrada de resíduos vegetais na camada superficial do solo, juntamente com a ausência de atividades antrópicas extremas (Rossetti *et al.*, 2014a; Kunde *et al.*, 2016; Nanzer *et al.*, 2019). O COP nas áreas estudadas representa, aproximadamente 20 % do COT do solo.

O PP foi o sistema que mais se destacou nas concentrações de COP nas camadas inferiores, sendo estatisticamente maior que a MN e a ILP. Essa maior entrada de COP está associada à intensa rebrota da gramínea, através da deposição da liteira, ao não revolvimento do solo, pela renovação da pastagem ser feita a cada 3 anos e por influência do sistema radicular das gramíneas que são fundamentais para a estabilização de C (Salton *et al.*, 2008; Nanzer *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2019).

Na MN, o maior aporte de COP ocorreu na profundidade mais superficial (0-5 cm), com 4,90 g/kg de solo, devido ao aporte constante de material orgânico, principalmente da serrapilheira, já que com profundidade há uma redução.

O sistema ILP apresentou o dobro de valores de COP em relação à MN (camada de 5-10 cm) e não diferiu estatisticamente nas profundidades de 10-20 e 20-30 cm.

Tabela 10. Teores de COP no solo sob Mata Nativa de Cerrado, Pastagem Produtiva e Integração lavoura-pecuária, em Unaí (MG).

Profundidades (cm)	MN	PP	ILP
0-5	4,90 a	2,73 b	0,77 c
5-10	1,12 c	4,13 a	2,73 b
10-20	0,64 b	1,10 a	0,51 b
20-30	0,47 b	0,72 a	0,36 b

* Médias de mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey à 5% de significância (P<0,05).

4.3.2 Carbono orgânico associado aos minerais

Os resultados de carbono orgânico associado aos minerais (COAM) estão apresentados na Tabela 11.

Em todas as profundidades, o PP apresentou os maiores teores de COAM, exceto na última camada que não diferiu da MN. Esses maiores teores de COAM estão relacionados, principalmente, a textura do solo (muito argiloso), a uma maior entrada de carbono lável via exsudatos radiculares, que podem se associar com a fração argila do solo, formando o COAM. A entrada de raízes em profundidade, estimulam a atividade biológica, tem papel importante na estabilização do C na fração mineral do solo (Cotrufo & Lavallee, 2021). O COAM representa, aproximadamente 80 % do COT do solo. O COAM por ter maior estabilidade química e ser menos sensível ao manejo foi a fração que apresentou maior proporção do carbono no solo (Ensinas *et al.*, 2016; Balin *et al.*, 2017; Guimarães *et al.*, 2018).

O sistema ILP, é uma estratégia eficaz de recuperação de áreas degradadas, proporciona benefícios sociais, econômicos e ambientais, foi a área que obteve menores teores de COAM somente na camada de 0-5 cm. Nas demais camadas esse sistema incrementou ou manteve os teores de COAM quando comparado a MN. Gazolla *et al.* (2015) observaram valores de COAM em ILP semelhantes aos da MN em maiores profundidades.

Já os valores baixos encontrados no ILP são explicados com o histórico da área, onde sabe-se que o ILP foi implantado a 4 anos em uma área onde antes era um pasto sujo. Porém, com o passar dos anos, caso continuem com as práticas de recuperação, o objetivo é que haja melhoria na quantidade dessas frações do carbono no solo e que a qualidade e quantidade de MOS se restabeleça mais rápido (Bell & Moore, 2012).

Tabela 11. Teores de COAM no solo sob Mata Nativa de Cerrado, Pastagem Produtiva e Integração lavoura-pecuária, em Unaí (MG).

Profundidades (cm)	MN	PP	ILP
0-5	13,61 b	19,80 a	1,48 c
5-10	8,08 c	21,92 a	11,17 b
10-20	6,06 b	9,94 a	2,29 c
20-30	5,18 a	7,41 a	2,41 b

* Médias de mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey à 5% de significância ($P<0,05$).

4.4 Estabilidade dos agregados do solo

Os resultados de DMP estão representados na Tabela 12. Entre os diferentes tratamentos avaliados, observa-se que os valores de DMP variaram entre 4,38 e 2,36 cm, na camada de 0-5 cm, e entre 4,40 e 2,34, para a camada de 5-10 cm. Os resultados mostram que não houve diferença estatística significativa ($P<0,05$) no DMP entre MN e PP tanto para a profundidade de 0-5 cm quanto para de 5-10 cm. Esses valores assemelham-se aos encontrados por Falcão *et al.* (2020), onde os maiores valores de DMP foram encontrados nas áreas de MN e PP, 4,54 e 4,31 mm, respectivamente.

Esse resultado se deve, primeiramente, à não perturbação do solo por máquinas agrícolas e maior deposição de material orgânico, resultando na manutenção e/ou melhoria da estabilidade dos agregados do solo (Sithole & Magwaza; Thibaud, 2019). A área de PP, assemelha-se a MN por possibilitar a deposição de material orgânico na superfície e na subsuperfície do solo via sistema radicular da gramínea, nesse caso o capim Miyagi que atua de forma positiva na agregação.

O PP apresentou valores de DMP 1,7 vezes maior comparado com a ILP nas duas profundidades. Esse resultado pode ser explicado pelo manejo do solo adotado onde, no PP o pasto é feito por rotação animal, respeitando os limites da planta. Áreas com maior estabilidade de agregados, consequentemente, promovem maior mitigação de CO_2 por obterem maior proteção do COS (Szakács, 2007).

O ILP, é um local em recente restauração, que foi implantado há 4 anos em um local onde anteriormente era apenas um pasto sujo, mas com o passar do tempo pretende-se que a utilização do sistema ILP melhore as propriedades edáficas por conta da palhada e raízes da pastagem que provocam o aumento nos teores de carbono e consequentemente a estabilidade de agregados.

Tabela 12. Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados do solo sob Mata Nativa de Cerrado, Pastagem Produtiva e Integração lavoura-pecuária, em Unaí (MG).

Profundidades (cm)	MN	PP	ILP
0-5	4,35 a	4,04 ab	2,37 b
5-10	4,37 a	4,40 a	2,34 b

** As médias de mesma letra, dentro da linha, não diferem de si pelo teste de Tukey à 5% de significância.

5 CONCLUSÃO

A conversão de MN para PP não reduziu os teores de C no solo em nenhuma das profundidades analisadas. Pelo contrário, esse sistema de manejo manteve e/ou aumentou os teores de C no solo, indicando que a PP pode contribuir para a manutenção do estoque de carbono. Os teores de N seguiram o mesmo comportamento, reforçando a importância do manejo adequado na conservação desses elementos no solo. Adicionalmente, a PP proporcionou maior preservação do carbono lábil (COAP), exceto na profundidade de 0-5 cm, e do carbono estável no solo (COAM). Do carbono total estocado no solo, aproximadamente, 80 % está na forma estável (COAM), o que é importante pois é um carbono que se encontra mais firmemente retido no solo, sendo mais difícil a sua perda para a atmosfera na forma de GEE.

O sistema ILP apresentou menores estoques de C em relação a PP e a MN (0-100 cm). O efeito do manejo foi mais pronunciado na camada superficial (0-10 cm) apresentando estoque de C superior a MN. A ILP também não difere da MN na camada de 0-30 cm.

O maior índice de agregação do solo foi apresentado pela área de MN e PP, logo, áreas de PP possibilitam a deposição de material orgânico na superfície e na subsuperfície do solo via sistema radicular atuando de forma positiva na agregação do solo. Os estoques de C e a estabilidade dos agregados do solo estão correlacionados, pois o manejo adequado pode promover o estoque de carbono e melhorar a estrutura do solo.

Conclui-se que, considerando os atributos físicos e químicos do solo, o sistema de manejo PP pode ser adotado em Unaí-MG, no bioma Cerrado, visando à manutenção da segurança do solo. O sistema ILP apresenta grande potencial, mas os resultados obtidos até o momento refletem o curto tempo de implantação, sendo necessário um maior período de monitoramento para avaliar plenamente seus benefícios.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, A. et al. Mapping Three Decades of Changes in the Brazilian Savanna Native Vegetation Using Landsat Data Processed in the Google Earth Engine Platform. **Remote Sensing**, v. 12, p.924-947, 2020.
- ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; CORDEIRO, L. A. M.; EVANGELISTA, B. A. Sequestro de carbono e mitigação de emissões de gases de efeito estufa pela adoção de sistemas integrados. In: BUNGENSTAB, D. J. (Org). **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 835 p.
- ASSUNÇÃO, S. A.; PEREIRA, M. G.; ROSSET, J. S.; BERBARA, R. L. L.; GARCÍA, A. C. Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 658, p. 901-911, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.271>
- BACANI, Vitor Matheus; VICK, Erivelton Pereira. FUTURE SCENARIO PREDICTION USING CELLULAR AUTOMATA AND MARKOV CHAIN IN EXPANSION AREA OF FORESTRY OVER BRAZILIAN CERRADO. **Mercator**, v. 18, 2019.
- BALBINO, L.; KICHEL, N.; BUNGENSTAB, D.; ALMEIDA, R. Sistemas de integração: conceitos, considerações, contribuições e desafios. In: Bungenstab, DJ (ed) **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**, Embrapa, Brasília, p. 31-48, 2019.
- BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. (Ed.). **Marco Referencial: integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2011. 130 p.
- BALIN, N. et al. Frações da matéria orgânica, índice de manejo do carbono e atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Scientia agraria**, v. 18, n. 3, p. 85-94, 2017.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil Till**, v. 86, p.237-245, 2006.
- BAYER, C.; MIELNICZUK. J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.599-607, 2000.
- BEEL, L.; MOORE, A. Integrated crop–livestock systems in Australian agriculture: Trends, drivers and implications. **Agricultural Systems**, v. 111, p. 1-12, 2012.
- BOCUTI, E.; AMORIM, R.; SANTOS, T.; RAIMO, L.; E PEREIRA, H. Erodibilidade entre-sulcos e sua relação com atributos de solos do Cerrado. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, p. 68-78, 2019
- BODDEY, R., C.P. JANTALIA, P.C.E. CONCEIÇÃO, J.A. ZANATTA, J. MIELNICZUK, J. DIECKOW, H.P. SANTOS, J.Ê. DENARDIN, S.J. GIACOMINI, S.C.S. URQUIAGA & B.J.R. ALVES. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology** v. 16, p. 784-795, 2010.
- BOND, W. J., WILGEN, B. W. **Fire and plants**. London: Chapman & Hall. 1996. 263 p.

- BOSSUYT, H., SIX, J., HENDRIX, P. Soil carbon protection by microaggregates inside earthworm molds. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 37, 251-258, 2005.
- BOTTINELI, N., CAPWIEZ, J.Y.P., PODWOJEWSKI, P., GRIMALDI, M., PENG, X. Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? **Soil and Tillage Research**, v. 146, p. 118-124, 2015. DOI: 10.1016/j.still.2014.01.007.
- BRADY, N. E WEIL, R. The nature and Properties of soils. 14ed. Pearson-Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, EUA, 2008.
- BRAZ, S.P.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; JANTALIA, C.P.; GUIMARÃES, A.P.; DOS SANTOS, C.A.; DOS SANTOS, S.C.; PINHEIRO, É.F.M, BODDEY, R.M. Soil Carbon Stocks under Productive and Degraded Brachiaria Pastures in the Brazilian Cerrado. **Soil Science Society of America Journal**, 77, p.914-928, 2013.
- BUNGENSTAB, D. J; ALMEIDA, R. G. de; LAURA, V. A.; BALBINO, L. C.; FERREIRA, A. D. **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta** (editores técnicos). Brasília, DF: Embrapa, 2019, 835 p.
- CAMBARDELLA, C.A., ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic matter changes across a grassl and cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777-783. 1992.
- CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA) E CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA AGRICULTURA E PECUÁRIA (CNA). PIB do agronegócio brasileiro de 1996 a 2018. Disponível em: < <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx> >. <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx> Acesso em: 12 out. de 2023
- CERRI, C.; MOREIRA, C.; ALVES, P.; TOLEDO, F. Estoques de carbono e nitrogênio no solo devido a mudança do uso da terra em áreas de cultivo de café em minas gerais. **Coffee Science**, v. 12, p. 30, 2017.
- CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; VOLKOFF, B. & RONDÓN, M.A. Potential of soil carbon sequestration in the Amazonian Tropical Rainforest. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. & CERRI, C.E.P. Carbon sequestration in soils of Latin America. New York, Haworth, 2006. p.245-266.
- CHEN, H.; SHRESTHA, B. Stand age, fire and clear cutting affect soil organic carbon and aggregation of mineral soils in boreal forests. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 50, p. 149-157, 2012.
- CHEVALLIER, T., BLANCHART, E., ALBRECHT, A., FELLER, C. The physical protection of soil organic carbon in aggregates: a mechanism of carbon storage in a Vertisol under pasture and market gardening (Martinique, West Indies). **Agriculture, Ecosystems & Environmen**. v. 103, p. 375–387, 2004.
- CONCEIÇÃO, P. C.; DIECKOW, F. BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil & Tillage Research**, v. 129, p.40-47, 2013.
- CORBEELS, M.; MARCHÃO, R. L.; SIQUEIRA, N. M.; FERREIRA, E. G.; MADARI, B. E.; SCOPEL, E.; BRITO, O. R. Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-

- tillage systems in the Cerrado of Brazil. **Scientific reports**, v. 6, art. 21450, 2016.
- CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R.L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARTHA JÚNIOR, G. B. M. Integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, p. 15-53, 2015.
- COSTA, A.; ALBUQUERQUE, J.; MAFRA, A. L.; SILVA, F. R. Propriedades físicas do solo em sistemas de manejo na integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.235-244, 2009.
- COSTA, E.; SILVA, H.; RIBEIRO, P. Matéria orgânica do solo e seu papel na manutenção e liderança dos sistemas agrícolas. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia/GO, v. 9, n. 17, pág. 1843-1860, 2013.
- COSTA JUNIOR, C., M. SIQUEIRA NETO, M.C. PICCOLO & P.B. CAMARGO. Nitrogênio e abundância natural de ^{15}N em agregados do solo sob diferentes usos da terra no Bioma Cerrado. **Ensaios e Ciência**, v. 15, p. 47-66, 2011.
- COTRUFO, M., SOONG, J., HORTON, A., CAMPBELL, E., HADDIX, M., WALL, D., & PARTON, W. Formação de esteiras orgânicas do solo através de vias bioquímicas e físicas de perda de massa do lixo. **Nature Geoscience**, v. 8, p. 776-779, 2015. <https://doi.org/10.1038/ngeo2520>
- COTRUFO, M.F.; & LAVALLÉE, J.M. Chapter One - Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. **Advances in Agronomy**, v.172, p.1-66, 2022.
- CHRISTENSEN, B. Structure and organic matter storage in agricultural soils. In: CARTER, M. R., STEWART, B. A. (Ed.). Structure and organic matter storage in agricultural soils. **Boca Raton: CRC**, p. 97-165, 1996.
- CRUZ, S.S. da. 2016. Produção e qualidade de silagens de sorgo em sistema de integração lavoura-pecuária no cerrado de baixa altitude. Tese (Doutorado em Sistemas de Produção). Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira.
- DA FONSECA, D. M. e MARTUSCELLO, J.A. **Plantas Forrageiras**. Viçosa. UFV, 2010. 537p.
- DAMIAN, J.M.; MATOS, E.; PEDREIRA, B.; CARVALHO, P.; PREMAZZI, L.; WILLIAMS, S.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C. Predicting soil C changes after pasture intensification and diversification in Brazil. **Catena**, v. 202, 105238, 2021.
- DIXON, R. K. Agroforestry Systems - Sources and Sinks of Greenhouse Gases. **Agroforestry Systems**, v. 31, n. 2, p. 99–116, 1995.
- DON, A.; SCHUMACHER, J.; FREIBAUER, A.: Impact of Tropical Land-use Change on Soil Organic Carbon Stocks – a Meta-analysis, **Global Change Biology**, 17, 1658–1670, doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x, 2011.
- DOSSOU-YOVO, E. R.; BRÜGGEMANN, N.; JESSED, N.; HUATE, J.; AGO, E. E.; AGBOSOUB, E. K. Reducing soil CO₂ emission and improving upland rice yield with no-

tillage, straw mulch and nitrogen fertilization in northern Benin. **Soil & Tillage Research**. v. 156, p. 44–53, 2016.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, v. 997, p. 65 – 67. 2017.

ENSINAS, S. C.; SERRA, A. P.; MARCHETTI, M. E.; SILVA, E. F.; PRADO, E. A. F.; LOURENTE, E. R. P.; ALTOMAR, P. H.; POTRICH, D. C; MARTINEZ, M. A.; CONRAD, V. A.; JESUS, M. V.; EL KADRI, T. C. Cover crops affect on soil organic matter fractions under no till system. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 4, p. 503-512, 2016.

FABRIZZI, K.P., C.W. RICE, T.J.C. AMADO, J. FIORIN, P. BARBAGELATA & R. MEL-CHIORI. Protection of soil organic C and N in temperate and tropical soils: effect of native and agroecosystems. **Soil Biology and Biogeochemistry**, v. 92, p. 129-143, 2009.

FALCÃO, K.; MONTEIRO, F.; OZÓRIO, J.; SOUZA, C. FARIAS, P.; MENEZES, R.; PANCHUKI, E.; ROSSET, J. Estoque de carbono e agregação do solo sob diferentes sistemas de uso no cerrado. **Brazilian Journal of Environmental Science**, v. 55, p. 242-255, 2020.

FAO. **A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol**. Rome. 2020, p. 5-20. <https://doi.org/10.4060/cb0509en>, 2020.

FERNANDES J. C. F., PEREIRA, M. G., NETO, E. C. S., NETO, T. A. C. Caracterização de agregados biogênicos, intermediários e fisiogênicos em áreas sob domínio de mata atlântica. **Revista Caatinga**, v. 30, p. 59-67, 2017.

FRACETTO, F. J. C. et al. Emissões de gases de efeito estufa na produção de mamona e de seus subprodutos. **Revista Caatinga**, v.28, n. 4, p. 90-98, 2015.

FRANCO, J.; GANEM, R.; BARRETO, C. Devastação e conservação no bioma cerrado: duas dinâmicas de fronteira. **Expedições Teoria da História e Historiografia**, Goiás, v. 7, n. 2, p. 56-83, ago./dez. 2016. Disponível em: https://www.revista.ueg.br/index.php/revista_geth/article/view/5708. Acesso em: 12 abr. 2023.

FRANCOSO, R. D.; BRANDAO, R.; NOGUEIRA, C. C.; SALMONA, Y. B.; MACHADO, R. B.; COLLI, G. R. Habitat loss and the effectiveness of protected areas in the Cerrado biodiversity hotspot. **Natureza & Conservação**, v. 13, p. 35-40, Jan./Jun. 2015. DOI: 10.1016/j.ncon.2015.04.001.

FREITAS, L. et al. Estoque de carbono de latossolos em sistemas de manejo natural e alterado. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 228-239, 2018.

FUJISAKI, K.; CHAPUIS-LARDY, L.; ALBRECHT, A.; RAZAFIMBELO, T.; CHOTTE, J.; CHEVALLIER, T. Data synthesis of carbon distribution in particle size fractions of tropical soils: Implications for soil carbon storage potential in croplands. **Geoderma**, v. 313, p. 41-51, 2018.

GAZOLLA, P.; GUARESCHI, R.; PERIN, A.; PEREIRA, G. E ROSSI, C. Frações da Matéria Orgânica do Solo Sob Pastagem, Sistema Plantio Direto e Integração lavoura-pecuária. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 2, p. 693-704, 2015.

GELAW, A.M., SINGH, B.R., LAL, R. Organic carbon and nitrogen associated with soil aggregates and particle sizes under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia. **Land Degradation & Development**, v. 26, p. 690-700, 2015.

GOLCHIN, A., OADES, J. M., SKJEMSTAD, J. O., CLARKE, P. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. **Australian Journal of Soil Research**, v. 32, p. 285-309, 1994.

GONTIJO NETO, M. M.; BORGHI, E.; RESENDE, A. V.; CAMPANHA, M. M.; COSTA, T. C. C.; SIMÃO, E. P.; ALMEIDA, R. G.; ALVES, F. V.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V. **Mitigação de gases de efeito estufa em sistema de Integração Pecuária-Floresta e potencial de produção de Carne Carbono Neutro**: Fazenda Lagoa dos Currais, Curvelo, MG. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2018. 17 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 230).

GRUPO ESPERANÇA RURAL. **Você conhece o capim Miyagui?** Disponível em: <<https://www.grupoesperancarural.com.br/voce-conhece-o-capim-miyagui/>>. Acesso em: 02 out. 2023.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G. M.; PERIN, A. Densimetric fractionation of organic matter in an agricultural chronosequence in no-till areas in the Cerrado region, **Brazil. Semina: Ciências Agrárias**, v. 37, n. 2, p. 596-610, 2016. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n2p595>

GUIMARÃES, D. V.; SILVA, M. L. N.; BEINIACH, A.; BISPO, D. F. A.; CONTINS, J. G. P.; CURI, N. Relationship between soil organic matter fractions and cover plants in Olive post planing. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 40, n. 6, e-027, 2018.

HOUGHTON, R.A. Contemporary C cycle. **Treatize on Geochemistry**, p. 399–435, 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Biomas e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil - 1:250.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

IBGE retrata cobertura natural dos biomas do país de 2000 a 2018. *Agência de Notícias IBGE*, 26 mar. 2021. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/28943-ibge-retrata-cobertura-natural-dos-biomas-do-pais-de-2000-a-2018>. Acesso em: 12 abr. 2023

IPCC - Intergovernmental Panel in Climate Change. **Climate change: the scientific basis**. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001.

IWATA, B. F. **Dinâmica da matéria orgânica em argissolo vermelho amarelo sob sistemas agroflorestais no cerrado piauiense**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Piauí, Teresinha, 2010.

JANTALIA, C.P.; RESCK, D.V.S.; ALVES, B.J.R.; ZOTARELLI, L.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. Tillage effect on C stocks of a clayey Oxisol under a soybean-based crop rottion in the Brazilian Cerrado region. **Soil and Tillage Research**. v.95, p.97-109, 2007.

JÚNIOR, L. G. F.; SANTOS, C. O.; MESQUITA, V. V.; PARENTE, L. L. Dinâmica das pastagens Brasileiras: Ocupação de áreas e indícios de degradação - 2010 a 2018. Laboratório de

Processamento de Imagens e Geoprocessamento da Universidade Federal de Goiás (LA-PIG/UFG). 19 p. out. 2020.

KEMPER, W. D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK,C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E. & CLARK, F.E. (Eds.). Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Part 1. Madison: **American Society of Agronomy**. p.499-510, 1965.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). Methods of soil analysis. Madison: **American Society of Agronomy**, v.1, p.425-442, 1986.

KHORRAMDEL, S.; KOCHEKI, 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.

KICHEL, A. N.; COSTA, J. A. A.; ALMEIDA, R. G.; PAULINO, V. T. Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPP) - experiência no Brasil. **Boletim de Indústria Animal**, v. 71, n. 1, p. 94-105, 2014.

KLEBER, M., EUSTERHUES, K., KEILUWEIT, M., MIKUTTA, C., MIKUTTA, R., & NICO, P. S. Associações minerais-orgânicas: Formação, propriedades e relevância em ambientes do solo. **Avanços na Agronomia**, v. 130, p. 1-140, 2015.

KLUTHCOUSKI, J.; CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; SALTON, J. C.; MACEDO, M. C. M.; ZIMMER, A. H.; BALBINO, L. C.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MÜLLER, M. Conceitos e modalidades da estratégia de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (Ed.). **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 21-33. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas).

KÖGEL-KNABNER, I., GUGGENBERGER, G., KLEBER, M., KANDELER, E., KALBITZ, K., SCHEU, S., ... LEINWEBER, P. Associações organominerais em solos temperados: Integração de biologia, mineralogia e matéria orgânica químico-istérica. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, p. 61-82, 2008. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700048>

KUNDE, R. J.; LIMA, C. L. R.; SILVA, S. D. A.; PILLON, C. N. Frações físicas da matéria orgânica em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1520-1528, 2016.

LABORDE, D.; MAMUN, A.; MARTIN, W. et al. Agricultural subsidies and globalgreenhousegas emissions. **Nature Communications**, v. 12 n. 2601, p. 1-9, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22703-1>

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate chance and food security. **Science**. v. 304, p. 1623-1627, 2004.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma, Amisterdan**, v. 123, p. 122, 2002.

LAL, Rattan. Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. **Soil Science and Plant Nutrition**, [S. l.], v. 66, n. 1, p. 1-9, 2020.

DOI:10.1080/00380768.2020.1718548.

Disponível

em:

[https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1718548.](https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1718548)

- LAL, R. Societal value of soil carbon. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 6, p. 186–192, 2014.
- LAVALLEE J., SOONG J., COTRUFO M. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v.26, p. 261-273, 2020. <https://doi.org/10.1111/gcb.1485>
- LE QUÉRÉ, C., MORIARTY, R., ANDREW, R.M., PETERS, G.P., CIAIS, P., FRIEDLINGSTEIN, P., BODEN, T.A., 2014. Global carbon budget. **Earth System Science Data**. v. 7, p. 521–610, 2014.
- LE QUÉRÉ, C., MORIARTY, R., ANDREW, R.M., CANADEL, J.G., ZENG, N. Global carbon budget 2015. **Earth System Science Data** v. 7, p. 349–396, 2015.
- LIU, X.B.; HAN, X.Z.; HERBERT, S.J.; XING, B. Dynamics of soil organic carbon under different agricultural management system in the black soil of China. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.34, p.973-984, 2003.
- LOSS A., et al. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica. **Ciência Rural**, v. 39, p. 1067-1072, 2009.
- LOSS, A., M.G. PEREIRA, N. SCHULTZ, E.P. FERREIRA, E.M.R. SILVA & S.J. BEUTLER. Distribuição dos agregados e carbono orgânico influenciados por manejos agroecológicos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, p. 523-528, 2009.
- LOPES, A. S.; DAHER, E. Agronegócio e recursos naturais no cerrado: desafios para uma coexistência harmônica. In: FALEIRO, F. G.; FARIAS-NETO, A. L. (Eds.). Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais. Planaltina - DF: Embrapa Cerrados, p. 173–209, 2008.
- LUGATO, E.; PANIAGUA L.; JONES A. et al. Complementing the topsoil information of the Land Use/Land Cover Area Frame Survey (LUCAS) with modelled N₂O emissions. **Plos One**, v. 12, n. 4, p.e0176111, 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176111>.
- MACEDO, M. C. M.; ARAÚJO, A. R. de. Sistemas de integração lavoura-pecuária: alternativas para recuperação de pastagens degradadas. In: BUNGENSTAB, D. J. (Org). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta:** a produção sustentável. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2012. p. 27-48.
- MACHADO, P. L. O. Soil carbon and the mitigation of global climate change. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422005000200026>
- MADARI, BE; MACHADO, PLOA; TORRES, E.; ANDRADE, AG de; VALENCIA, LIO Efeitos do plantio direto e rotação de culturas na agregação do solo e carbono orgânico em um Ferralsolo Ródico do sul do Brasil. **Soil & Tillage Research**, v. 80, n. 1-2, p. 185-200, 2005.
- MALHEIROS, R. A Influência da Sazonalidade na Dinâmica da Vida no Bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Climatologia**, Goiás, v. 19, ano 12, jul/dez 2016.
- MENDONÇA, ES; ROWELL, DL Frações minerais e orgânicas de dois Latossolos e sua influência na capacidade efetiva de troca catiônica. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, n. 6, p. 1888-1892, 1996.

METZGER, JP, ESLER, K., KRUG, C., ARIAS, M., TAMBOSI, L., CROUZEILLES, R., ACOSTA, AL, BRANCALION, PHS, D'ALBERTAS, F., DUARTE, GT, GARCIA, LC, GRYTNES, J.-A., HAGEN, D., JARDIM, AVF, KAMIYAMA, C., LATAWIEC, AE, RODRIGUES, RR, RUGGIERO, PGC, SPAROVEK, G., STRASSBURG, B., SARAIVA, AM, JOLY, C. Best practices for using scenarios for restoration planning. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 29, p. 14-25, 2017.

MINASNY, B., MALONE, B.P., MCBRATNEY, A.B., ANGERS, D.A., ARROUAYS, D., CHAMBERS, A., CHAPLOT, V., CHEN, Z.-S., CHENG, K., DAS, B.S., FIELD, D.J., GIMONA, A., HEDLEY, C.B., HONG, S.Y., MANDAL, B., MARCHANT, B.P., MARTIN, M., MCCONKEY, B.G., MULDER, V.L., O'ROURKE, S., RICHER-DE-FORGES, A.C., ODEH, I., PADARIAN, J., PAUSTIAN, K., PAN, G., POGGIA, L., SAVIN, I., STOLBOVOY, V., SULAEMAN, Y., STOCKMANN, U., SULAEMAN, Y., TSUI, C.-C., VAGEN, T.-G., VANWESEMAEL, B., WINOWIECKI, L. Soil carbon 4 per mille. **Geoderma**, v. 292, p. 59-86, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA. Disponível em:<https://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php> Acesso em: 02 out. 2023

MIRANDA, H. S.; SATO, M. N.; NETO, W. N.; AIRES, F. S. Fires in the cerrado, the Brazilian savanna. In: **Tropical Fire Ecology**, Springer Praxis Books, p. 427–450, 2009. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-77381-8_15.

MMA, Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. O Bioma Cerrado. 2014 Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/potencialidades-do-cerrado-sao-tema-de-debate-em-sete-oficinas>>. Acesso em: 12 set. 2023

MORGAN, P.; HEYERDAHL, E. K.; STRAND, E. K.; BUNTING, S. C.; RISER II, J. P.; ABATZOGLOU, J. T.; NIELSEN-PINCUS, M.; JOHNSON, M. Fire and land cover change in the Palouse Prairie–forest ecotone, Washington and Idaho, USA. **Fire Ecology**, v. 16, n. 1, p. 1-17, 2020. <https://doi.org/10.1186/s42408-019-0061-9>

MUTEGI, J.; PETERSEN, B.; MUNKHOLM, L. Carbon turnover and sequestration potential of fodder radish cover crop. **Soil Use and Management**, v. 29, p. 191-198, 2013 doi:10.1111/sum.12038

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, G. A. B.; KENTS, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, p. 853-858, 2000.

NANZER, M. C.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; BARRETA, P. G. V.; OLIVEIRA, T. P.; SILVA, J. R. M.; PAULINO, L. A. Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, n. 1, p. 136-145, 2019.

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.

NICODEMO, M. L. F.; PRIMAVESI, O. Serviços ambientais em sistemas silvipastoris. In: BUNGENSTAB, D. J. (Org). **ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 835 p.

OLIVEIRA, F.; SILVA, J.; CAMPOS FILHO, R. Águas do Cerrado: da Pujança à Agonia

OLIVEIRA, P. P. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; MEO FILHO, P. de; BERNDT, A.; PEDROSO, A. de F.; BERNARDI, A. C. de C. Balanço e emissões de gases de efeito estufa em sistemas integrados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA; ENCONTRO DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA NO SUL DO BRASIL, 4., 2017, Pato Branco. **Intensificação com sustentabilidade: anais**. Cascavel: UTFPR, 2017. p. 23-32.

OLIVEIRA, P. P. A. & CORSI, M. Recuperação de pastagens degradadas para sistemas intensivos de produção de bovinos. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. 23p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Circular Técnica, 38).

OSÓRIO, R. M. L.; AZEVEDO, D. B. Percepções dos Especialistas Frente às Mudanças Climáticas: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta como Alternativa Sustentável à Produção de Alimentos, Fibras e Energia no Agronegócio. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 7, n. 2, p. 257-278, 2014

PACHAURI, R.; REISINGER, A. Climate change 2007: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genebra: IPCC, 104p. 2007.

PENG, X., YAN, X., ZHOU, H., ZHANG, Y.Z., SUN, H. Assessing the contributions of sesquioxides and soil organic matter to aggregation in an Ultisol under long-term fertilization. **Soil Tillage Research**, v. 146, p. 89–98, 2015.

PEREIRA, M.G., A. LOSS, S.J. BEUTLER & J.L.R. TORRES. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em áreas de Cerrado sob plantio direto, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 508-514, 2010.

POEPLAU, C., DON, A., SIX, J., KAISER, M., BENBI, D., CHENU, C., ... NIEDER, R. Isolation of organic carbon fractions with turnover rates in temperate agricultural soils - A comprehensive method comparison. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 125, p. 10-26, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.06.025>

PUGET, P., CHENU, C., & BALESIDENT, J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. **European Journal of Soil Science**, v. 51, p. 595-605, 2000. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2000.00353.x>

RABBI, S. M. F.; WILSON, B. R.; LOCKWOOD, P. V.; DANIEL, H.; YOUNG, I. M. Aggregate hierarchy and carbon mineralization in two Oxisols of New South Wales, Australia. **Soil & Tillage Research**, v. 146, p. 193-203, 2015. <https://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.10.008>

RAIESI, F. The quantity and quality of soil organic matter and humic substances following dry-farming and subsequent restoration in an upland pasture. **Catena**, v.202, 105249, 2021.

RABOT, E., WIESMEIER, M., SCHLUTER, S., VOGEL, H. J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, p. 122-137, 2018. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.11.009

RAMOS, F.T; DORES, EF de C; WEBER, OL dos S.; BEBER, D.C; CAMPELO JÚNIOR, JH; MAIA, JC de S. A matéria orgânica do solo duplica a capacidade de troca catiônica do solo tropical sob plantio direto no Brasil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, n 9, p. 3595-3602, 2018.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. J. et al. Frações oxidáveis do carbono orgânico de Latossolo cultivado com cafeiro em diferentes espaçamentos de plantio. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 2, p. 429-437, 2008.

REINERT, D.; REICHERT, J. Propriedades físicas do solo. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de; RIBEIRO, J. F. (Orgs.). **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília: Embrapa, 2008. p. 152-212.

RIBON, A. A.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; FERNANDES, K. L.; HERMOGENES, L.; TALLES, V. Alterações na estabilidade de agregados de latossolo e argissolo em função do manejo, na entrelinha da seringueira (*Hevea brasiliensis*). **Revista Árvore**, v. 38, n. 6, p. 1065-1071, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622014000600011>.

RODRIGUES, LA, ALVES, CZ, REGO, CHQ, SILVA, TRB, SILVA, JB Ácido húmico na germinação e vigor de sementes de milho. **Revista Caatinga**, Mossoró/RN, v. 30, n. 1, pág. 149 a 154, 2017.

ROSSET, J. S.; LANA, M. C.; PEREIRA, M. G. et al. Frações químicas e oxidáveis da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo, em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1529-1538, 2016.

SÁ, J. C. M. et al. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research**, v. 136, p.38-50, 2014.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 11-21, 2008.

SANO, E. et al., Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 818-828, 2019.

SANTOS, IL dos; CAIXETA, CF; SOUSA, AATC de; FIGUEIREDO, CC de; RAMOS, MLG; CARVALHO, AM de. Plantas de cobertura e nitrogênio mineral: efeitos nas frações da matéria orgânica em um Latossolo sob plantio direto no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1874-1881, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000600022>.

SCHARLEMANN, J. P.; TANNER, E. V.; HIEDERER, R.; KAPOS, V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. **Carbon Management**, v.5, p.81-91, 2014.

SCHIMEL, D. S. et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. **Nature**, v.414, p.169–172, 2001.

SILVA & MENDONÇA ES. 2007. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS RF et al. Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS. p. 275-374

SCHRUMPF, M., KAISER, K., GUGGENBERGER, G., PERSSON, T., KOEGELKNABNER, I., & SCHULZE, E.-D. Storage and stability of organic carbon in soils as related to depth, occlusion within aggregates, and attachment to minerals. **Biogeosciences**, v. 10, p. 1675-1691, 2013 <https://doi.org/10.5194/bg-10-1675-2013>.

SILVA, E. A.; OLIVEIRA, G.C.; CARDUCCI, G.C. et al. Doses crescentes de gesso agrícola, estabilidade de agregados e carbono orgânico em Latossolo do Cerrado sob Cafeicultura. **Rivista de Ciências Agrarias -Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 56, n. 1, p. 25-32, 2013. <https://doi.org/10.4322/rca.2013.012>.

SILVA, E. F. et al. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. **Pesquisa agropecuária brasileira**, 46:1321-1331, 2011.

SILVA, E. F.; LOURENTE, E. P. R.; MARCHETTI, M. E.; MERCANTE, F. M.; FERREIRA, A. K. T. F.; FUJII, G. C. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura pecuária, **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.46, n.10, p.1321-1331, 2011.

SILVA & MENDONÇA ES. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS RF et al. Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS. p. 275-374, 2007.

SILVA, R. A.; CRESTE, J. E.; MEDRADO, M. J. S.; MAREGA, I. Sistemas integrados de produção: O novo desafio para a agropecuária brasileira. **Colloquium Agrarie**, v. 10, n. 1, p. 55-68, 2014.

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.

SITHOLE, N. J.; MAGWAZA, L. S.; THIBAUD, G. R. Long-term impact of no-till conservation agriculture and N-fertilizer on soil aggregate stability, infiltration and distribution of C in different size fractions. **Soil and Tillage Research**, v. 190, p. 147-156, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.004>

SMITH J.L.; MYUNG, H.U. Rapid procedures for preparing soil and KCl extracts for ¹⁵N analysis. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.21, p.2273-2279, 1990

SMITH, P., COTRUFO, M. F., RUMPEL, C., PAUSTIAN, K., KUIKMAN, P. J., ELLIOTT, J. A., ... SCHOLE, M. C. Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. **SOIL**, 1, 665–685, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-1-665-2015>.

SIX, J., BOSSUYT, H., DEGRYZE, S., DENEUF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil Tillage Research**, v. 79, p. 7–31, 2004.

SOUZA et al. Can N₂ fixation by forage legumes build soil organic matter to rival fertilizer N in a tropical forest biome?. **Geoderma Regional**, v. 33, e00646, 2023.

SPOHN, M., GIANI, L. Water-stable aggregates, glomalin-related soil protein, and carbohydrates in a chronosequence of sandy hydromorphic soils. **Soil Biology Biochemistry**, v. 42, p. 1505–1511, 2010.

STOCKMANN, U.; PADARIAN, J. MCBRATNEY, A.; MINASNY, B. Global soil organic carbon assessment. **Global Food Security**, v. 6, p. 9-16, 2015. DOI:10.1016/j.gfs.2015.07.001

STRASSBURG, B.B.N., BROOKS, T., FELTRAN-BARBIERI, R., IRIBARREM, A., CROUZEILLES, R., LOYOLA, R., LATAWIEC, A.E., SCARAMUZZA, C.A.M., SCARANO, F.R., SOARES-FILHO, B., BALMFORD, A. Moment of truth for the Cerrado hotspot. **Nature Ecology & Evolution**, 1, 99, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0099>.

STÜRMER, S. L. K.; ROSSATO, O. B.; COPETTI, A. C. C.; SANTOS, D. R.; CALEGARI, A.; BRUM, B. Variações nos teores de carbono orgânico em função do desmatamento e revegetação natural do solo. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 241-250, 2011. <http://dx.doi.org/10.5902/198050983228>.

SZAKÁCS, G.G.J. **Estoques de carbono e agregados do solo cultivado com cana-de-acucar**: efeito da palhada e do clima no centro-sul do Brasil. 2007. 105p. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba.

TAVARES, P.C. Produção e valor nutritivo de *Panicum maximum* Jacq. Cv. Miyagui manejada sob duas alturas de resíduo, 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

TOTSCHE, K. U., AMELUNG, W., GERZABEK, M. H., GUGGENBERGER, G., KLUMPP, E., KNIEF, C., ... KÖGEL-KNABNER, I. Microaggregates in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 181, p. 104-136, 2018. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600451>

THOMAZ, E. L. Influência da temperatura no diâmetro e na estabilidade de agregados em chernossolo, Saskatchewan, Canadá. **Ciencia del Suelo**, v. 29, n. 2, p. 277-284, 2011.

VICENTE, L. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; MARCIANO, C. R. Organic carbon within soil aggregates under forestry systems and pasture in a southeast region of Brazil. **Catena**, v. 182, 104139, 2019.

VILELA, L.; MARTHA JUNIOR, G. B.; MACEDO, M. C. M.; MARCHÃO, R. L.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; PULROLNIK, K.; MACIEL, G. A. Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1127-1138, 2011.

YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal American Society of Agronomy**, v. 28, p.337-35, 1936.

ZHANG, Z.B., ZHOU, H., LIN, H., PENG, X. Puddling intensity, sesquioxides, and soil organic carbon impacts on crack patterns of two paddy soils. **Geoderma**, v. 262, p. 155–164, 2016.

ZHOU, Q.X., SONG, Y.F., 2004. Contaminated Soil Remediation: Principles and Methods (in Chinese). Science Press, Beijing.