

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA

AMANDA PAIVA LACERDA INACIO

CARBONO ORGÂNICO DO SOLO E ESTABILIDADE DE AGREGADOS EM
LATOSSOLO SOB DIFERENTES USOS NO CERRADO, MG

UBERLÂNDIA

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA

AMANDA PAIVA LACERDA INACIO

**CARBONO ORGÂNICO DO SOLO E ESTABILIDADE DE AGREGADOS EM
LATOSSOLO SOB DIFERENTES USOS NO CERRADO, MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de
Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Beno Wendling:

Coorientadora: Prof^ª. Dra. Araújo Hulmann Batista

UBERLÂNDIA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

I35c
2025

Inacio, Amanda Paiva Lacerda, 1995-
Carbono orgânico do solo e estabilidade de agregados em latossolo
sob diferentes usos no Cerrado, MG [recurso eletrônico] / Amanda Paiva
Lacerda Inacio. - 2025.

Orientador: Beno Wendling.

Coorientadora: Araína Hulmann Batista.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Instituto de Ciências Agrárias, Programa de Pós-graduação em
Agronomia.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.5584>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Agronomia. 2. Solos - Manejo. 3. Solos - Teor de carbono. 4.
Cerrados. 5. Latossolos. I. Wendling, Beno, 1972-, (Orient.). II. Batista,
Araína Hulmann, 1977-, (Coorient.). III. Universidade Federal de
Uberlândia. Instituto de Ciências Agrárias. Programa de Pós-graduação
em Agronomia. IV. Título.

CDU: 631

Rejâne Maria da Silva
Bibliotecária-Documentalista – CRB6/1925

**CARBONO ORGÂNICO DO SOLO E ESTABILIDADE DE AGREGADOS EM
LATOSSOLO SOB DIFERENTES USOS NO CERRADO, MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Agronomia.

APROVADA em 29 de julho de 2025

Banca Examinadora:

Araína Hulmann Batista – Doutora (ICIAG)

Larissa Barbosa de Sousa – Doutora (ICIAG)

Hérica Leonel de Paula Ramos Oliveira - Doutora

Michele Ribeiro Ramos – Doutora UNITINS

UBERLÂNDIA

2025



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agronomia				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 013/2025, PPGAGRO				
Data:	Vinte e nove de julho de dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	10:30
Matrícula do Discente:	12312AGR001				
Nome do Discente:	Amanda Paiva Lacerda Inácio				
Título do Trabalho:	Carbono orgânico do solo e estabilidade de agregados em Latossolo sob diferentes usos no Cerrado, MG				
Área de concentração:	Produção Vegetal				
Linha de pesquisa:	Uso e Recuperação de Solos e Resíduos na Agricultura				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: Larissa Barbosa de Sousa (UFU); Hérica Leonel de Paula Ramos Oliveira (UFU); Michele Ribeiro Ramos (UFT); Araína Hulmann Batista (UFU) coorientadora da candidata.

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dra. Araína Hulmann Batista, apresentou a Comissão Examinadora e o(a) candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Araína Hulmann Batista, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/07/2025, às 13:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Larissa Barbosa de Sousa, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/07/2025, às 15:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Michele Ribeiro Ramos, Usuário Externo**, em 30/07/2025, às 11:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Hérica Leonel de Paula Ramos Oliveira, Usuário Externo**, em 30/07/2025, às 14:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6503426** e o código CRC **F10F9E6E**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança nos momentos mais desafiadores.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Beno Wendling, pelo apoio durante todo o trabalho, e a minha coorientadora, Profa. Dra. Araína Hulmann Batista, por sua paciência, dedicação e incentivo. A orientação de ambos foi essencial para a construção deste estudo.

Aos técnicos e colaboradores do laboratório, que foram fundamentais para a realização das análises e coletas de dados.

Aos meus pais, ao meu filho e ao meu namorado, por todo o apoio, amor e suporte diário. Vocês foram a base dessa caminhada.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho fosse possível. A cada um de vocês, meu mais sincero agradecimento.

RESUMO

Sistemas de manejo do solo inadequados reduzem a estabilidade de agregados, comprometendo o carbono orgânico do solo, sua estrutura, a produtividade agrícola e o equilíbrio ambiental. Este trabalho teve como objetivo avaliar o teor de carbono orgânico total (COT) em cada classe de agregados do solo e relacioná-lo à estabilidade e ao tamanho médio dos agregados em Latossolos sob diferentes sistemas de manejo, em distintas profundidades. Os usos do solo foram considerados como tratamentos e foram coletadas amostras de solo em uma propriedade agrícola na região rural de Uberlândia, MG, em quatro sistemas de manejo: i., Latossolo com cerrado nativo (T1) ii., Latossolo sob plantio direto (T2); iii., Latossolo sob cultivo convencional (T3); iv., e Latossolo com cultivo de grãos em sistema irrigado (T4). Foram coletadas amostras em quatro profundidades (0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm), com quatro repetições em cada sistema de cultivo, mediante abertura de quatro trincheiras até as profundidades avaliadas. As amostras foram analisadas quanto à estabilidade e ao índice de estabilidade de agregados (IEA), frações agregadas obtidas em peneiras de diferentes diâmetros (2 mm, 1 mm, 0,5 mm e 0,25 mm) e teor de COT em cada classe de agregados. Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas pelo teste de Dunnett e pela correlação de Pearson. O sistema de plantio direto apresentou os melhores resultados em estabilidade de agregados e teores de COT, superando inclusive o cerrado nativo em algumas camadas. Esse desempenho reforça a importância da cobertura vegetal e da ausência de revolvimento para manter a qualidade física e química do solo. Entre os sistemas intensivos, o cultivo convencional mostrou-se menos degradante que o pivô central. O COT demonstrou ser um bom indicador da qualidade do solo, mas deve ser interpretado em conjunto com outros atributos. Práticas conservacionistas são essenciais para a sustentabilidade dos Latossolos do Cerrado.

Palavras-chave: carbono orgânico; plantio direto; plantio convencional; manejo do solo.

ABSTRACT

Inadequate soil management systems reduce aggregate stability, compromising soil organic carbon, soil structure, agricultural productivity, and environmental balance. The objective of this study was to evaluate the stability of aggregates under different cropping systems and soil depths, and to relate this stability to the total organic carbon (TOC) content of Oxisols in the Cerrado biome. The land use types were considered treatments, and soil samples were collected from a farm in the rural area of Uberlândia, Minas Gerais, Brazil, under the following four management systems: (i) native Cerrado vegetation (T1); (ii) a no-tillage system (T2); (iii) conventional tillage system (T3); and (iv) an irrigated grain cropping system (T4). Samples were collected at four depths (0–10, 10–20, 20–40, and 40–60 cm), with four replicates in each system. Four trenches were dug to the targeted depths for sampling. The samples were analyzed for aggregate stability and the aggregate stability index (ASI). The aggregate fractions were examined based on the mesh size of the sieves used (2 mm, 1 mm, 0.5 mm, and 0.25 mm). Additionally, the total organic carbon (TOC) content was determined for each aggregate class. The results were analyzed using an analysis of variance, and the means were compared using Dunnett's test and Pearson's correlation. The no-tillage system produced the best results in terms of aggregate stability and TOC levels, surpassing even the native Cerrado in some layers. These results underscore the importance of maintaining vegetation cover and avoiding soil disturbance in order to preserve the soil's physical and chemical quality. Among intensive systems, conventional tillage caused less degradation than central pivot irrigation. TOC proved to be a good indicator of soil quality, but it should be interpreted alongside other attributes. Conservation practices are essential for the sustainability of Oxisols in the Cerrado.

Keywords: Conventional tillage; No-tillage; Soil management; Soil organic carbon.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo geral	14
1.2	Objetivo específico.....	14
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	15
2.1	Estabilidade de agregados	16
2.2	Avaliação do Carbono Orgânico Total em cada classe de agregado	17
2.3	Índice de estabilidade agregados.....	17
2.4	Textura do solo	18
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
3.1	Índice de estabilidade de agregados.....	19
3.2	Carbono orgânico	24
3.3	Matriz de correlação	28
4	CONCLUSÃO	31
	REFERÊNCIAS.....	32

1 INTRODUÇÃO

A produtividade agrícola está diretamente relacionada à qualidade do solo, que, além de servir como suporte físico, é essencial para o fornecimento de água e nutrientes para as plantas, para a ciclagem da matéria orgânica, a atividade biológica e a filtragem de poluentes. No Brasil, o bioma Cerrado destaca-se pela ampla ocupação agrícola e pela sua importância estratégica, sendo responsável por cerca de 60% da produção nacional de grãos. A partir da década de 1970, a incorporação de tecnologias, como correção da acidez, adubação e práticas conservacionistas, foi decisiva para transformar o Cerrado em um dos principais polos de produção agrícola do mundo (EMBRAPA, 2017).

Dentre as diferentes classes de solo encontradas no Cerrado, os Latossolos são a classe de solo mais abundante no Brasil, ocupando aproximadamente 39% do território nacional. Embora sejam quimicamente pobres, com alta acidez e baixos teores de nutrientes, destacam-se por sua excelente qualidade física, com estrutura granular estável e boa porosidade. São solos profundos, com agregados de muita estabilidade, boa drenagem e significativa retenção de água, além de serem altamente resistentes à erosão (Santos *et al.*, 2018). Essas características os tornam especialmente aptos para a agricultura em larga escala, desde que manejados de forma adequada (IBGE, 2024).

Mesmo com as excelentes características físicas dos Latossolos, a degradação desse tipo de solo permanece como um dos maiores desafios da agricultura moderna, sobretudo em áreas de uso intensivo, como o Cerrado. O uso inadequado dos recursos naturais contribui para a intensificação de processos como erosão, compactação, perda de nutrientes, acidificação, redução da matéria orgânica e menor infiltração de água. Nesse contexto, o Sistema Plantio Direto (SPD) configura-se como uma das estratégias mais eficazes para a conservação e recuperação do solo. Ao manter a cobertura vegetal, evitar o revolvimento e promover a rotação de culturas, o SPD favorece a estabilidade estrutural, aumenta o teor de matéria orgânica e contribui para a sustentabilidade do sistema (Sá *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2019).

Embora importantes avanços tenham sido alcançados na adoção de sistemas conservacionistas, a utilização do Sistema de Plantio Convencional (SPC) ainda é expressiva entre os produtores. Considerando que a área cultivada no Cerrado ultrapassa 25 milhões de hectares, estima-se que mais de 20 milhões ainda estejam sob preparo convencional, o que reforça a persistência desse sistema no bioma. Esse tipo de manejo, caracterizado pela exposição do solo e pela ausência de cobertura permanente, compromete a qualidade física e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Goddard *et al.*, 2021). Além disso, a exposição aos

agentes climáticos favorece a desagregação das partículas, a compactação e a erosão, comprometendo também a biodiversidade e as funções ecológicas do solo (Freitas, 2019).

Um dos aspectos mais críticos afetados pelo manejo inadequado do solo é a estabilidade dos agregados, que desempenha papel fundamental na porosidade, na retenção de água e na movimentação de gases e nutrientes (Tormena *et al.*, 2008). O uso intensivo de práticas agrícolas convencionais, como a aração e a gradagem, promove a fragmentação dos agregados, resultando na dispersão de partículas primárias e podendo causar a obstrução dos poros do solo. Esse processo compromete o desenvolvimento das raízes e a capacidade de absorção de água e nutrientes pelas plantas, além de intensificar a degradação estrutural do solo. Consequentemente, a qualidade física do solo é significativamente afetada, resultando em redução da produtividade e em perdas de solo por erosão (Aguar, 2008).

Estudos realizados por Silva *et al.* (2019) demonstraram que, após dez anos de adoção do plantio direto no Cerrado, houve um aumento de aproximadamente 35% na estabilidade dos agregados em comparação ao cultivo convencional. Os autores atribuíram esses resultados ao incremento de matéria orgânica e à consequente melhoria da qualidade física do solo. De forma semelhante, Santos *et al.* (2018) relataram que sistemas conservacionistas, como a integração lavoura-pecuária, promovem ganhos consistentes nos atributos físicos do solo já a partir de cinco anos de implantação, principalmente no aumento da resistência estrutural e na melhoria da porosidade.

Os sistemas de manejo conservacionista têm potencial não apenas para conservar, mas também para regenerar solos degradados, alinhando-se aos princípios da agricultura regenerativa, que incluem cobertura permanente, mínimo revolvimento e diversificação de culturas. O solo atua como o maior reservatório terrestre de carbono, armazenando de duas a três vezes mais carbono que a vegetação (Six *et al.*, 2002). Entre os indicadores de qualidade, o carbono orgânico total (COT) se destaca por estar diretamente relacionado à formação de agregados estáveis, à retenção de água e à atividade biológica. Solos com maiores teores de COT apresentam melhor estrutura física, maior resistência à compactação, maior biomassa microbiana e melhor mineralização de nutrientes, contribuindo para a resiliência dos sistemas agrícolas (Six *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2014).

Além disso, o carbono orgânico é um reservatório de nutrientes essenciais para as plantas e desempenha um papel significativo no ciclo do carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Em solos de baixa fertilidade, como os Latossolos, a incorporação de carbono orgânico por meio de práticas como a adubação verde e o plantio direto é fundamental

para aumentar a capacidade de retenção de água e melhorar a atividade microbiana, tornando o solo mais resistente à erosão e à compactação (Santos *et al.*, 2018).

Nesse contexto, o carbono orgânico total (COT) se destaca como um dos principais indicadores da qualidade dos solos tropicais, especialmente os Latossolos. Ele está diretamente associado à melhoria da estrutura física do solo por meio da formação de agregados estáveis, ao aumento da retenção de água e ao estímulo da atividade microbiana, essencial para a ciclagem de nutrientes e a decomposição de resíduos (Silva *et al.*, 2014; Six *et al.*, 2002). O aumento do COT favorece a agregação das partículas, reduz a compactação, melhora a infiltração e atua como reservatório de nutrientes essenciais, como nitrogênio, fósforo e enxofre (Lal, 2004; Silva *et al.*, 2014). Além disso, o COT exerce papel relevante no sequestro de carbono atmosférico — os solos podem armazenar até 2.400 gigatoneladas de carbono, superando o estoque presente na vegetação e na atmosfera combinadas (Ipcc, 2022; Lal, 2020). Assim, práticas como plantio direto, adubação verde e manejo da matéria orgânica são fundamentais para elevar os teores de carbono nos Latossolos e garantir a sustentabilidade a longo prazo (Santos *et al.*, 2018).

Embora os Latossolos estejam presentes em regiões tropicais com alta temperatura e intensa atividade microbiana, condições que favorecem a decomposição da matéria orgânica, eles ainda apresentam teores consideráveis de COT, especialmente quando manejados com práticas conservacionistas. Segundo Bayer *et al.* (2004), é comum encontrar valores de COT entre 20 e 40 g kg⁻¹ na camada superficial desses solos sob plantio direto. Essa estabilidade está relacionada às interações organominerais entre a matéria orgânica e os óxidos de ferro e alumínio, que se concentram nas partículas mais finas do solo, como as de argilas e silte. Tais interações protegem a matéria orgânica contra a decomposição microbiana e favorecem seu acúmulo. Além disso, a matéria orgânica contribui diretamente para a formação e estabilização de agregados, atuando como agente cimentante por meio de exsudatos radiculares, substâncias húmicas e compostos microbianos. Assim, o aumento do COT está ligado à melhoria da estrutura do solo, promovendo maior agregação, resistência à erosão e retenção de água (Tisdall; Oades, 1982; Six *et al.*, 2002).

Além dos aspectos ligados ao manejo, é importante considerar que os Latossolos oxidícos, predominantes em regiões tropicais como o Cerrado, apresentam estrutura granular altamente estável por natureza. Essa estabilidade está relacionada à sua mineralogia, rica em óxidos de ferro e alumínio, presentes majoritariamente na fração argila e, em menor proporção, na fração silte. A fração areia, por ser composta por partículas maiores e mais grosseiras,

contém poucos óxidos; ainda sim, esses óxidos favorecem a formação de agregados estáveis mesmo em condições de uso intensivo.

As interações organominerais são fundamentais para a formação e a estabilidade dos agregados do solo, especialmente em Latossolos, onde predominam argilas de baixa atividade e óxidos de ferro e alumínio. Essas interações ocorrem entre os grupos funcionais da matéria orgânica, como os carboxílicos e fenólicos, de carga negativa, e as superfícies minerais com cargas variáveis, formando ligações eletrostáticas e pontes com cátions como Fe^{3+} e Al^{3+} . Esse processo contribui para a proteção da matéria orgânica contra a decomposição e favorece a formação de agregados estáveis, essenciais para a qualidade física do solo (Silva; Mielniczuk, 1997). Os Latossolos, por sua vez, apresentam estrutura granular composta por agregados pequenos, estáveis e friáveis, conferindo boa porosidade e elevada resistência à compactação. Essas características os tornam favoráveis ao uso agrícola, desde que manejados com práticas conservacionistas que preservem a matéria orgânica e evitem a degradação estrutural e química (Santos *et al.*, 2018).

Considerando a importância de compreender as alterações nos atributos do solo em função dos diferentes sistemas de cultivo e profundidades, este estudo tem como objetivo analisar essas mudanças em Latossolos da região do Triângulo Mineiro, MG.

1.1 Objetivo geral

Avaliar o teor de carbono orgânico total em cada classe de agregados do solo e relacioná-lo à estabilidade e ao tamanho médio dos agregados, em Latossolos sob diferentes sistemas de manejo e em diferentes profundidades.

1.2 Objetivo específico

- Determinar o Índice de Estabilidade de Agregados (IEA).
- Quantificar macroagregados (>2 mm) e frações menores.
- Determinar o diâmetro médio ponderado e diâmetro médio geométrico dos agregados em diferentes sistemas de cultivo.
- Avaliar o COT em cada classe de agregados.
- Correlacionar atributos físicos e químicos do solo.

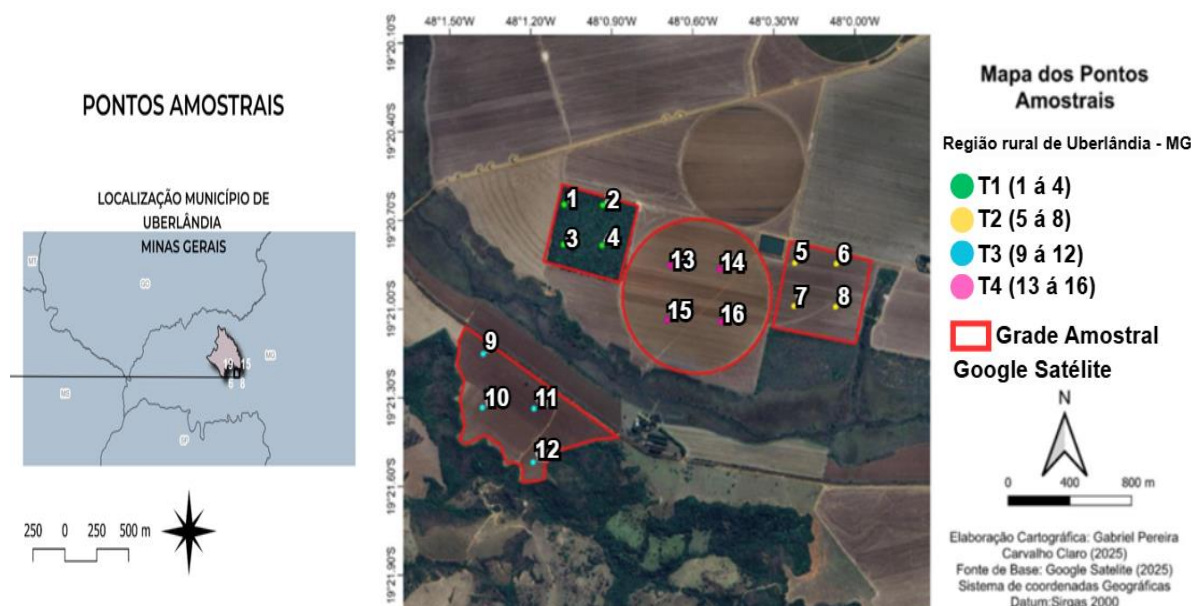
2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em propriedades agrícolas localizadas na região rural de Uberlândia, MG, em área de Latossolo Vermelho Distrófico típico. Foram considerados quatro diferentes usos do solo: T1. cerrado nativo; T2. plantio de grãos em sistema plantio direto; T3. plantio de grãos em sistema cultivo convencional; e T4. sistema convencional de culturas diversas em área de pivô de irrigação. O delineamento experimental foi conduzido em esquema fatorial, composto por 4 sistemas de cultivo, 4 profundidades e 4 repetições. Em cada sistema de cultivo foram abertas quatro trincheiras (visando possibilitar a repetição e obtenção dos valores médios de cada área) com 60 cm de profundidade, para a retirada de amostras de solo em quatro camadas, 0 – 10 cm, 10 – 20 cm, 20 – 40 cm e 40 – 60 cm.

A Figura 1 mostra o mapa com a localização dos pontos onde as amostras de solo foram coletadas em cada sistema de manejo. O mapa ajuda a visualizar como as áreas foram distribuídas e organizadas para a coleta, destacando a separação entre os diferentes tratamentos avaliados.

Apresenta-se o mapa dos pontos amostrais na região rural de Uberlândia- MG, conforme Figura 1.

Figura 1 - Localização dos pontos amostrais em quatro sistemas de manejo – Zona rural de Uberlândia-MG.



Fonte: Google Earth Pro e Qgis, 2022.

2.1 Estabilidade de agregados

A separação e a posterior análise da estabilidade de agregados foram realizadas por tamisação úmida, segundo o método descrito pela EMBRAPA (2018). O peneiramento a seco foi efetuado passando a amostra por duas peneiras, uma de 4,00 mm e outra de 2,00 mm, com fundo coletor. A fração de terra retida na peneira de 2,00 mm foi utilizada para a avaliação da estabilidade de agregados. Após a obtenção dessa amostra, foram pesados 25 g de solo em duplicata, distribuídos em dois conjuntos, cada um com quatro peneiras com aberturas de 2,00 mm, 1,00 mm, 0,50 mm e 0,25 mm, sendo então agitadas em agitador de Yoder por 4 minutos, seguidos de 4 minutos em repouso. Em seguida, cada classe de agregados foi colocada em estufa a 105 °C por 24 horas e, logo após, cada amostra foi pesada separadamente em cada classe de agregados.

Apresenta-se a imagem das diferentes classes de agregados obtidas após passarem no agitador de Yoder, conforme Figura 2.

Figura 2 - Diferentes classes de agregados obtidas pelo método.



Fonte: A autora, 2024.

O diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG), que avaliam o tamanho médio dos agregados do solo e refletem a qualidade da estrutura do solo e

sua resistência à desagregação, foram calculados com base na massa dos agregados retidos em cada peneira durante o teste de estabilidade de agregados.

O Diâmetro Médio Ponderado (DMP) dos agregados (Kemper & Rosenau, 1986):

$$DMP = \sum (x_i \cdot w_i), \quad i = 1 \text{ até } n$$

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

x_i = diâmetro médio de cada classe de agregados.

O Diâmetro Médio Geométrico (DMG) dos agregados (Kemper & Rosenau, 1986):

$$DMG = \exp \left[\sum (w_i \cdot \log x_i) / \sum w_i \right], \quad i = 1 \text{ até } n$$

w_i = peso de agregados (g) dentro de uma classe de agregados de diâmetro médio x_i .

2.2 Avaliação do Carbono Orgânico Total em cada classe de agregado

A determinação do carbono orgânico nas amostras de agregados foi realizada por digestão úmida e titulação, conforme o método de Walkley-Black, descrito pela EMBRAPA (2018). Das classes de agregados obtidas em cada peneira, após passarem no agitador de Yoder e serem levadas para a estufa, foram pesados 30 g de solo, após o destorroamento. Em um béquer, adicionaram-se 5 mL da solução de dicromato de potássio 0,167 mol/L (preparada pela dissolução de 49,04 g de $K_2Cr_2O_7$, previamente seco a 105 °C por 2 horas, em água destilada e completando o volume para 1 litro). Em seguida, adicionaram-se 10 mL de ácido sulfúrico concentrado. Após o resfriamento da amostra, o volume foi completado até 75 mL com água destilada, adicionando-se, então, 7 gotas do indicador ferroína (preparado pela dissolução de 1,485 g de fenantrolina monoidratada e 0,695 g de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ em 100 mL de água destilada). A titulação foi realizada com solução de sulfato ferroso 1 mol/L, preparada pela dissolução de 278 g de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ em 400 mL de água destilada, adicionando-se 15 mL de H_2SO_4 concentrado e completando o volume para 1 litro. O volume de solução de sulfato ferroso gasto na titulação de cada amostra foi anotado e utilizado para o cálculo da quantidade de carbono orgânico presente.

2.3 Índice de estabilidade agregados

O Índice de Estabilidade de Agregados (IEA) quantifica a capacidade dos agregados do solo (combinações de areia, silte e argila) de resistirem à desagregação por forças externas, como água e vento. Trata-se de um indicador de qualidade estrutural: solos com IEA elevado

apresentam maior capacidade de retenção de água, maior fertilidade e menor suscetibilidade à erosão.

Cálculo do IEA: após agitação em água, pesa-se a massa dos agregados estáveis (maiores que 2 mm) e compara-se à massa residual, utilizando-se a seguinte fórmula:

$$\text{IEA} = (\text{MASSA INICIAL} - \text{MASSA RESÍDUO}) / \text{MASSA INICIAL} * 100$$

Massa inicial de solo: peso seco total da amostra antes do teste.

Massa resíduo: peso das partículas que se desagregaram após imersão ou agitação.

Resultado: dado em porcentagem.

Valores maiores indicam agregados mais resistentes e solos estruturalmente mais saudáveis. Tormena et al. (2008) classificaram IEA superior a 80% como indicador de boa qualidade estrutural em Latossolos do Cerrado.

2.4 Textura do solo

A análise granulométrica do solo foi realizada pelo método da pipeta, conforme descrito por Gee e Bauder (1986). Este método baseia-se na separação das frações texturais por sedimentação em suspensão aquosa, de acordo com os princípios da Lei de Stokes, que considera a velocidade de decantação das partículas em função de seu diâmetro.

Inicialmente, as amostras de solo foram secas, destorroadas e peneiradas a 2 mm. Em seguida, uma subamostra foi tratada com solução dispersante (NaOH 1 mol.L⁻¹) e agitada mecanicamente para promover a completa dispersão dos agregados. Após a agitação, a suspensão foi transferida para cilindros de sedimentação, onde as partículas permaneceram em repouso por tempos previamente determinados. Amostras da suspensão foram então coletadas em diferentes profundidades com o uso de pipeta, permitindo a quantificação das frações de silte e argila. A fração areia foi determinada por peneiramento após a dispersão e lavagem da amostra.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Índice de estabilidade de agregados

O quadro 1 apresenta as médias do Índice de Estabilidade de Agregados (IEA), em porcentagem, de solos sob diferentes sistemas de cultivo e profundidades de amostragem. Ressalta-se que os solos de cerrado nativo são tomados como referência de qualidade, uma vez que a área nunca sofreu interferência antrópica.

Quadro 1 - Médias do índice de estabilidade de agregados (IEA), em porcentagem %, de solos provenientes de diferentes sistemas de cultivo e profundidades de amostragem.

Sistemas de cultivo	Profundidade (cm)			
	0 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60
	(%)			
Cerrado nativo (T1)	88,39	63,31	76,78	85,71
Plantio direto (T2)	93,29 *	88,77	71,70	93,10 *
Cultivo convencional (T3)	89,66	80,31	88,84	86,08
Pivô central (T4)	85,41	69,07	65,71	84,78

Médias seguidas por * diferem do T1 por meio do teste de Dunnett a 5% de significância.

Observa-se que os maiores valores de estabilidade de agregados foram obtidos nas camadas superficiais (0–10 cm), com tendência à redução em profundidades intermediárias (10–20 cm e 20–40 cm). O sistema plantio direto (T2) apresentou os maiores índices de estabilidade nas camadas de 0–10 cm e 40–60 cm, sendo estatisticamente superior ao tratamento de referência cerrado nativo (T1) nessas profundidades, conforme indicado pelo teste de Dunnett a 5% de significância. O sistema cultivo convencional (T3) também demonstrou boa estabilidade ao longo do perfil, especialmente na camada de 20–40 cm. Por outro lado, o tratamento pivô central (T4) apresentou os menores valores de IEA em praticamente todas as profundidades, com destaque negativo para as camadas de 10–20 cm e 20–40 cm. O tratamento cerrado nativo (T1), considerado como controle, apresentou valores intermediários, com

redução acentuada de estabilidade na camada de 10–20 cm, o menor entre todos os tratamentos nesta profundidade. Esses resultados indicam que o sistema de manejo adotado influencia diretamente a estabilidade dos agregados do solo, especialmente nas camadas mais superficiais, sendo que práticas conservacionistas, como aquelas representadas pelo sistema de plantio direto (T2), favorecem a maior estabilidade estrutural do solo.

É importante considerar que, apesar de numericamente inferiores, os resultados dos solos sob irrigação (T4) não diferiram estatisticamente da área de cerrado nativo. Nas áreas cultivadas, as profundidades com valores de IEA abaixo de 70% são consideradas críticas do ponto de vista físico. Embora o revolvimento do solo promova melhorias na porosidade, densidade e infiltração na camada superficial, as camadas subsuperficiais, especialmente a partir dos 20 cm, tendem a concentrar os efeitos das forças mecânicas aplicadas, resultando em compactação subsuperficial.

Resultados semelhantes foram observados por Tormena et al. (2008), que avaliaram diferentes sistemas de uso do solo e verificaram que o plantio direto promove maior estabilidade de agregados em comparação ao preparo convencional e à vegetação nativa. Os autores destacaram que a ausência de revolvimento, o acúmulo de resíduos vegetais na superfície e o maior teor de matéria orgânica contribuem para a formação de agregados mais estáveis, especialmente nas camadas superficiais do solo. Assim, a superioridade do sistema de plantio direto (T2), neste estudo, está de acordo com a literatura e reforça a eficácia do plantio direto na melhoria da qualidade física do solo.

O quadro 2 apresenta as médias da porcentagem de agregados maiores que 2 mm em solos submetidos a diferentes sistemas de cultivo e profundidades de amostragem.

Quadro 2 - Médias de agregados maiores que 2 milímetros, em porcentagem, de solos provenientes de diferentes sistemas de cultivo e profundidades de amostragem.

Sistemas de cultivo	Profundidade (cm)			
	0 – 10	10 - 20	20 – 40	40 - 60
	(%)			
Cerrado Nativo (T1)	51,87	22,73	32,20	44,42
Plantio direto (T2)	83,05 *	81,79 *	59,73 *	71,60 *
Cultivo convencional (T3)	63,29	56,68 *	54,90 *	52,50
Pivô central (T4)	38,13 *	37,21	30,61	40,98

Médias seguidas por * diferem do T1 por meio do teste de Dunnet a 5% de significância.

Observa-se que o sistema de plantio direto (T2) obteve os maiores percentuais de macroagregados em todas as profundidades analisadas, sendo significativamente superior ao tratamento de referência cerrado nativo (T1) em todas as camadas, conforme indicado pelo teste

de Dunnett a 5% de significância. O sistema cultivo convencional (T3) apresentou percentuais intermediários, com destaque para a camada superficial 0–10 cm, embora as camadas de 10–20 cm e 20–40 cm tenham apresentado diferenças significativas em relação ao tratamento de referência (T1). O tratamento pivô central (T4) apresentou os menores valores de agregados >2 mm, especialmente nas camadas de 0-10, 10–20 cm e 20–40 cm, evidenciando menor estabilidade estrutural do solo sob esse manejo. O solo sob cerrado nativo (T1), considerado como referência, apresentou os menores percentuais na camada de 10–20 cm, resultado que não era esperado, uma vez que devido aos baixos valores, demonstram maior fragilidade em relação aos demais solos avaliados.

Na profundidade de 20–40 cm, os sistemas de plantio direto (T2) e de cultivo convencional (T3) não apresentaram diferenças estatísticas, o que pode estar relacionado ao menor impacto direto do manejo em camadas subsuperficiais, onde o aporte de resíduos e a atividade biológica são naturalmente reduzidos. Ainda assim, os resultados indicam que sistemas conservacionistas, como o plantio direto, tendem a favorecer a formação e manutenção de macroagregados estáveis ao longo do perfil. No caso do cultivo convencional, a maior proporção de agregados nessa camada pode estar associada ao aumento do carbono orgânico decorrente do aporte de nutrientes via calagem e adubação.

Essa tendência também é observada em estudos como o de Assis e Lanças (2010), que verificaram aumento expressivo na proporção de agregados >2 mm em Nitossolo sob plantio direto, com valores que variaram de 37,9% a 89,0% conforme o tempo de adoção do sistema, em contraste com apenas 22,8% sob preparo convencional. Isso confirma que sistemas conservacionistas promovem a estabilidade de agregados ao longo do tempo, assim como observado no presente estudo, onde o tratamento por plantio direto (T2) apresentou superioridade em todas as profundidades avaliadas.

As médias do Diâmetro Médio Ponderado (DMP), em milímetros, de solos sob diferentes sistemas de cultivo e profundidades de amostragem encontram-se no Quadro 3.

Quadro 3 - Médias de diâmetro médio ponderado (DMP), em milímetros, de solos provenientes de diferentes sistemas de cultivo e profundidades de amostragem.

Sistemas de cultivo	Profundidade (cm)			
	0 - 10	10 - 20	20 – 40	40 - 60
	(mm)			
Cerrado Nativo (T1)	1,95	1,49	1,43	1,78
Plantio direto (T2)	2,61 *	2,31 *	1,97 *	2,42 *
Cultivo convencional (T3)	2,19 *	2,06	2,02 *	1,93

Pivô central (T4)	1,63 *	1,88	1,71	1,69
-------------------	--------	------	------	------

Médias seguidas por * diferem do T1 por meio do teste de Dunnett a 5% de significância.

Ressalta-se inicialmente que valores isolados não constituem a forma mais adequada de mensurar a qualidade estrutural do solo. Nesse sentido, a utilização do Índice de Estabilidade de Agregados (IEA) mostrou-se mais eficiente para representar as diferenças entre os sistemas de manejo (Quadro 1).

Na avaliação do Diâmetro Médio Ponderado (DMP), observou-se que o tratamento com plantio direto (T2) apresentou os maiores valores em todas as profundidades analisadas, com destaque para a camada de 0–10 cm. Esses valores foram significativamente superiores aos do tratamento de referência, o cerrado nativo (T1), conforme indicado pelo teste de Dunnett a 5% de significância. O tratamento com cultivo convencional (T3) também apresentou valores superiores aos de T1 em algumas profundidades, sendo estatisticamente maior nas camadas de 0–10 cm e 20–40 cm. Em contraste, o tratamento sob pivô central (T4), associado a um manejo mais intensivo e potencialmente degradante, apresentou os menores valores médios de DMP nas camadas de 0–10 cm e 20–40 cm, evidenciando menor estabilidade estrutural.

É importante destacar que o Cerrado nativo (T1), embora utilizado como referência de condição não manejada, apresentou os menores valores de DMP nas camadas de 10–20 cm e 20–40 cm, indicando maior fragilidade dos agregados nessas profundidades. Essa menor estabilidade estrutural pode estar associada à ausência de revolvimento mecânico, ao acúmulo mais lento de matéria orgânica em profundidade e à menor atividade biológica nessas camadas, características típicas de ambientes naturais não cultivados. Esses fatores podem limitar a formação de agregados mais resistentes à ação mecânica, como a promovida durante a análise de estabilidade.

Além disso, esse resultado pode ser relevante ao se considerar a abertura de novas áreas de Cerrado para uso agrícola, uma vez que as condições naturais de estabilidade estrutural em profundidade podem ser inferiores às observadas em solos cultivados sob manejo conservacionista. Ressalta-se, ainda, que os solos oxídicos típicos do Cerrado apresentam estrutura microgranular, frequentemente descrita como semelhante a "pó de café", cujos agregados, por apresentarem diâmetro inferior a 2 mm, podem não ser retidos na peneira utilizada na metodologia de avaliação (2 mm). Esse aspecto contribui para a obtenção de menores valores de DMP mesmo em condições não degradadas.

Entretanto, considerando as avaliações realizadas nas áreas cultivadas, os resultados evidenciam que sistemas de manejo conservacionistas, como o plantio direto (T2), promovem

maior estabilidade estrutural do solo, refletida em valores mais elevados de DMP. Esses dados estão de acordo com os achados de Souza et al. (2016), que observaram maior DMP em áreas sob plantio direto em comparação ao preparo convencional, associando essa melhora à presença de matéria orgânica, à ausência de revolvimento e à atividade biológica mais intensa. De forma semelhante, Salton et al. (2008) apontaram que a adoção de sistemas conservacionistas contribui para a formação de agregados maiores e mais estáveis, condição essencial para o aumento da resistência do solo à desagregação e à erosão. Portanto, o desempenho superior do T2 em todas as profundidades reforça a importância da adoção de práticas de manejo que favoreçam a conservação da estrutura do solo ao longo do perfil.

O quadro 4 apresenta as médias do Diâmetro Médio Geométrico (DMG), em milímetros, de agregados de solo sob diferentes sistemas de cultivo e profundidades de amostragem.

Quadro 4 - Médias de diâmetro médio ponderado (DMG), em milímetros, de solos provenientes de diferentes sistemas de cultivo e profundidades de amostragem.

Sistemas de cultivo	Profundidade (cm)			
	0 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60
	(mm)			
Cerrado Nativo (T1)	1,37	0,97	0,83	1,19
Plantio direto (T2)	2,18 *	1,91 *	1,26	1,99 *
Cultivo convencional (T3)	1,60	1,49	1,41 *	1,29
Pivô central (T4)	1,08	1,33	1,14	1,10

Médias seguidas por * diferem do T1 por meio do teste de Dunnett a 5% de significância.

Os maiores valores de DMG foram observados no sistema plantio direto (T2), especialmente nas camadas de 0–10 cm, 10–20 cm e 40–60 cm, sendo significativamente superiores ao tratamento referência cerrado nativo (T1) em todas essas profundidades, conforme o teste de Dunnett a 5% de significância. Esses resultados indicam uma maior estabilidade dos agregados formados nesse sistema de manejo, evidenciando os benefícios de práticas conservacionistas. O tratamento cultivo convencional (T3) apresentou valores intermediários de DMG, com destaque para a profundidade de 20–40 cm, que também se diferenciou estatisticamente do Cerrado nativo (T1). Já o tratamento pivô central (T4), associado a práticas mais degradantes, apresentou os menores valores de DMG em quase todas as camadas, principalmente na superfície (0–10 cm), refletindo uma menor resistência dos agregados à desagregação. O tratamento cerrado nativo (T1), utilizado como referência, teve os menores valores absolutos nas profundidades de 10–20 cm e 20–40 cm, sugerindo maior fragilidade estrutural do solo nessas camadas.

De modo geral, os dados do quadro 4 confirmam que sistemas conservacionistas, como o plantio direto (T2), favorecem a formação de agregados maiores e mais estáveis, enquanto sistemas degradantes promovem agregação deficiente. Resultados semelhantes foram encontrados por Salton et al. (2008), que observaram maior DMG em áreas manejadas com plantio direto, quando comparadas a áreas com preparo convencional. Os autores relacionaram esses resultados à maior proteção física do solo, ao aporte contínuo de resíduos vegetais e à preservação da biota edáfica, fatores que atuam como agentes estabilizadores dos agregados. Assim, os maiores valores de DMG obtidos no plantio direto (T2) reforçam a relevância de práticas conservacionistas para a manutenção da qualidade física do solo ao longo do perfil.

3.2 Carbono orgânico

O quadro 5 apresenta as médias de carbono orgânico total (em gramas por quilograma) em agregados do solo com diâmetro superior a 2 mm, oriundos de diferentes sistemas de cultivo, sistema plantio direto (T2), cultivo convencional (T3) e pivô central (T4) em relação ao tratamento de referência cerrado nativo (T1), em diferentes profundidades do solo.

Quadro 5 - Médias de carbono orgânico, em gramas por quilograma, retido em peneiras com orifícios de 2 mm de diâmetro, provenientes de diferentes sistemas de cultivo e profundidades de solo.

Sistemas de cultivo	Profundidade (cm)			
	0 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60
	(g/kg)			
Cerrado Nativo (T1)	24,57	14,49	11,64	9,18
Plantio direto (T2)	28,36	18,93 *	15,14 *	12,84 *
Cultivo convencional (T3)	18,08 *	14,64	11,90	10,68
Pivô central (T4)	21,66	12,58	12,87	11,16

Médias seguidas por * diferem do T1 por meio do teste de Dunnet a 5% de significância.

Observa-se que o sistema plantio direto (T2) apresentou os maiores teores de carbono orgânico em todas as camadas, com diferenças estatisticamente significativas em relação ao sistema de referência (T1) nas profundidades de 10–20 cm, 20–40 cm e 40–60 cm. Este resultado evidencia a maior capacidade do sistema plantio direto (T2) em promover a estabilização da matéria orgânica em macroagregados, o que sugere a presença de práticas conservacionistas que favorecem a formação e proteção dos agregados do solo, contribuindo para o sequestro e manutenção do carbono, conforme também demonstrado por Six et al. (2002), que associaram a estabilidade de macroagregados com o acúmulo de carbono orgânico mais recalcitrante, principalmente em sistemas com mínimo revolvimento.

No contexto do bioma Cerrado, reconhecido por seus solos altamente intemperizados, os resultados obtidos reforçam a importância da adoção de sistemas conservacionistas, como o plantio direto. A maior estabilidade de agregados e o acúmulo de carbono orgânico observados nesse sistema são especialmente relevantes em regiões onde a fertilidade natural é limitada e a perda de matéria orgânica pode comprometer a produtividade e a resiliência do solo. Além dos benefícios agronômicos, como o aumento da capacidade de retenção de água e nutrientes, a manutenção do carbono nos agregados contribui para a mitigação das mudanças climáticas ao atuar como importante reservatório de carbono no solo. Assim, práticas que preservam a estrutura do solo e favorecem o acúmulo de carbono orgânico são estratégicas para a sustentabilidade da agricultura no Cerrado.

No sistema cultivo convencional (T3), os valores de carbono foram intermediários, com diferença significativa em relação ao tratamento de referência Cerrado nativo (T1) apenas na camada superficial (0–10 cm). Isso pode indicar que o sistema apresenta algum nível de aporte orgânico e melhoria estrutural do solo, porém ainda limitado em profundidade. A ausência de diferenças significativas nas demais camadas sugere um efeito mais restrito, padrão semelhante ao reportado por Tormena et al. (2008), que destacam a necessidade de continuidade e tempo de implantação para que os ganhos em carbono se consolidem no perfil do solo.

Por outro lado, o sistema pivô central (T4) apresentou resultados inferiores aos de plantio direto (T2), com valores próximos aos de tratamento de referência Cerrado nativo (T1), especialmente nas camadas intermediárias e profundas. A ausência de diferenças significativas indica uma menor capacidade de retenção de carbono orgânico em macroagregados. De acordo com Salton et al. (2011), sistemas com revolvimento constante do solo tendem a romper os agregados, expondo a matéria orgânica à decomposição microbiana e, consequentemente, reduzindo os teores de carbono estabilizado.

O quadro 6 apresenta as médias de carbono orgânico (em gramas) retido em partículas de solo com diâmetro superior a 1 mm, analisadas em diferentes sistemas de cultivo, plantio direto (T2), cultivo convencional (T3) e pivô central (T4) em relação ao tratamento de referência cerrado nativo (T1), em diferentes profundidades do solo.

Quadro 6 - Médias de carbono orgânico, em gramas por quilograma, retido em peneiras com orifícios de 1 mm de diâmetro, provenientes de diferentes sistemas de cultivo e profundidades de solo.

Sistemas de cultivo	Profundidade (cm)			
	0 - 10	10 - 20	20 – 40	40 - 60

	(g/kg)			
Cerrado nativo (T1)	21,14	14,78	10,69	10,23
Plantio direto (T2)	25,64 *	18,87 *	12,07	11,79
Cultivo convencional (T3)	18,66	14,78	12,96	10,71
Pivô central (T4)	20,47	13,35	12,54	10,69

Médias seguidas por * diferem do T1 por meio do teste de Dunnet a 5% de significância.

Assim como observado nos agregados de maior tamanho, os resultados indicam que os agregados entre 2 e 1 mm apresentaram maior teor de carbono no sistema plantio direto (T2), nas camadas de 0–10 cm e 10–20 cm, com diferenças estatisticamente significativas em relação ao tratamento de referência, Cerrado nativo (T1), segundo o teste de Dunnet a 5% de significância. Esse comportamento mostra que o sistema T2, com o uso contínuo de cobertura vegetal, é mais eficaz na incorporação e proteção da matéria orgânica no solo, especialmente na forma associada a agregados de maior diâmetro. Essa tendência é confirmada por Six et al. (2002), que destacam que solos sob manejo conservacionista promovem maior estabilização do carbono orgânico nos macroagregados, reduzindo a decomposição e favorecendo o sequestro de carbono.

Os outros tratamentos não diferiram entre si nos teores de carbono nesta classe de agregados. Estudos como os de Tormena et al. (2008) destacam que mudanças nos estoques de carbono em frações estruturais do solo ocorrem de forma lenta e exigem continuidade e intensidade adequadas das práticas sustentáveis.

O quadro 7 apresenta os teores de carbono orgânico (em gramas) retidos em partículas de solo com diâmetro superior a 0,5 mm, em diferentes sistemas de cultivo, plantio direto (T2), Cultivo convencional (T3) e Pivô central (T4) em relação ao tratamento de referência Cerrado nativo (T1), em diferentes profundidades do solo.

Quadro 7 - Médias de carbono orgânico, em gramas por quilograma, retido em peneiras com orifícios de 0,5 mm de diâmetro, provenientes de diferentes sistemas de cultivo e profundidades de solo.

Sistemas de cultivo	Profundidade (cm)			
	0 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60
	(g/kg)			
Cerrado nativo (T1)	19,22	13,55	10,84	9,20
Plantio direto (T2)	20,36	16,96*	15,79*	9,48
Cultivo convencional (T3)	16,87	14,45	12,20	9,06
Pivô central (T4)	17,45	12,88	12,23	10,10

Médias seguidas por * diferem do T1 por meio do teste de Dunnet a 5% de significância.

Os dados indicam que o sistema plantio direto (T2) obteve os maiores valores de carbono em relação ao tratamento de referência cerrado nativo (T1), nas profundidades de 10–20 cm e 20–40 cm. Esse padrão revela eficiência do sistema plantio direto (T2), no incremento e estabilização da matéria orgânica associada a agregados médios, conforme demonstrado por Six et al. (2002), que destacam a importância da matéria orgânica para a formação de agregados estáveis e para o sequestro de carbono.

Os sistemas cultivo convencional (T3) e pivô (T4) apresentaram teores intermediários de carbono, com valores inferiores aos encontrados na área de sistema plantio direto (T2). Comparando-os ao cerrado nativo é certo afirmar que esses sistemas não promoveram ganhos na incorporação de carbono orgânico nas frações de 0,5 mm. Tormena et al. (2008) relatam que, em sistemas com transição parcial ou com baixo aporte de biomassa, o aumento do carbono nos agregados ocorre de forma lenta e gradativa, sendo mais evidente em longo prazo.

O quadro 8 apresenta os teores médios de carbono orgânico (em gramas) retidos em partículas de solo com diâmetro superior a 0,25 mm, oriundos de diferentes sistemas de cultivo, sistema plantio direto (T2), cultivo convencional (T3) e pivô central (T4) em relação ao tratamento de referência cerrado nativo (T1), em diferentes profundidades do solo.

Quadro 8 - Médias de carbono orgânico, em gramas por quilograma, retido em peneiras com orifícios de 0,25 mm de diâmetro, provenientes de diferentes sistemas de cultivo e profundidades de solo.

Sistemas de cultivo	Profundidade (cm)			
	0 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60
	(g/kg)			
Cerrado nativo (T1)	16,11	13,14	10,45	9,25
Plantio direto (T2)	11,61*	13,28	12,30	12,58
Cultivo convencional (T3)	13,00	12,01	9,62	9,82
Pivô central (T4)	11,54*	11,43	9,93	9,10

Médias seguidas por * diferem do T1 por meio do teste de Dunnet a 5% de significância.

Os resultados obtidos evidenciam contrastes importantes na distribuição do carbono orgânico entre as diferentes frações do solo no Cerrado, bioma marcado por solos oxídicos altamente intemperizados e de estrutura microgranular. Na camada superficial (0–10 cm) observou-se que os sistemas de plantio direto (T2) e pivô central (T4) apresentaram valores significativamente menores de carbono orgânico total (COT) na fração de microagregados (retidos em peneira de 0,25 mm), em comparação ao tratamento de referência, cerrado nativo (T1), conforme indicado pelo teste de Dunnett a 5% de significância.

Essa diferença sugere que, ao contrário das demais frações de maior diâmetro, T2 e T4 não foram tão eficazes na retenção de carbono em microagregados, possivelmente devido à menor proteção física conferida por essa fração. No entanto, no caso do sistema plantio direto (T2), essa menor concentração de carbono em agregados finos pode estar relacionada a processos positivos de estabilização do carbono em macroagregados mais estáveis, onde a matéria orgânica é fisicamente protegida contra a decomposição microbiana. Outra hipótese é que a maior atividade biológica geralmente observada em áreas sob SPD pode intensificar a mineralização do carbono mais lábil presente em microagregados, resultando em menores teores nessa fração específica.

Por outro lado, o elevado teor de carbono verificado no tratamento de referência (T1) pode estar associado às características intrínsecas dos solos do Cerrado. A estrutura microgranular típica desses solos, frequentemente descrita como semelhante a “pó de café”, tende a acumular carbono em partículas muito pequenas e estáveis, o que contribui para maiores valores nessa fração, mesmo em condições não manejadas.

Ao longo do perfil do solo, os sistemas não apresentaram diferenças estatísticas em relação ao T1. Contudo, o plantio direto (T2) manteve teores de carbono relativamente estáveis em todas as profundidades, enquanto o cultivo convencional (T3) e o pivô central (T4) mostraram tendência de redução. O sistema de referência (T1) apresentou os maiores valores na camada superficial, reflexo da maior ciclagem de nutrientes e da constante deposição de resíduos orgânicos.

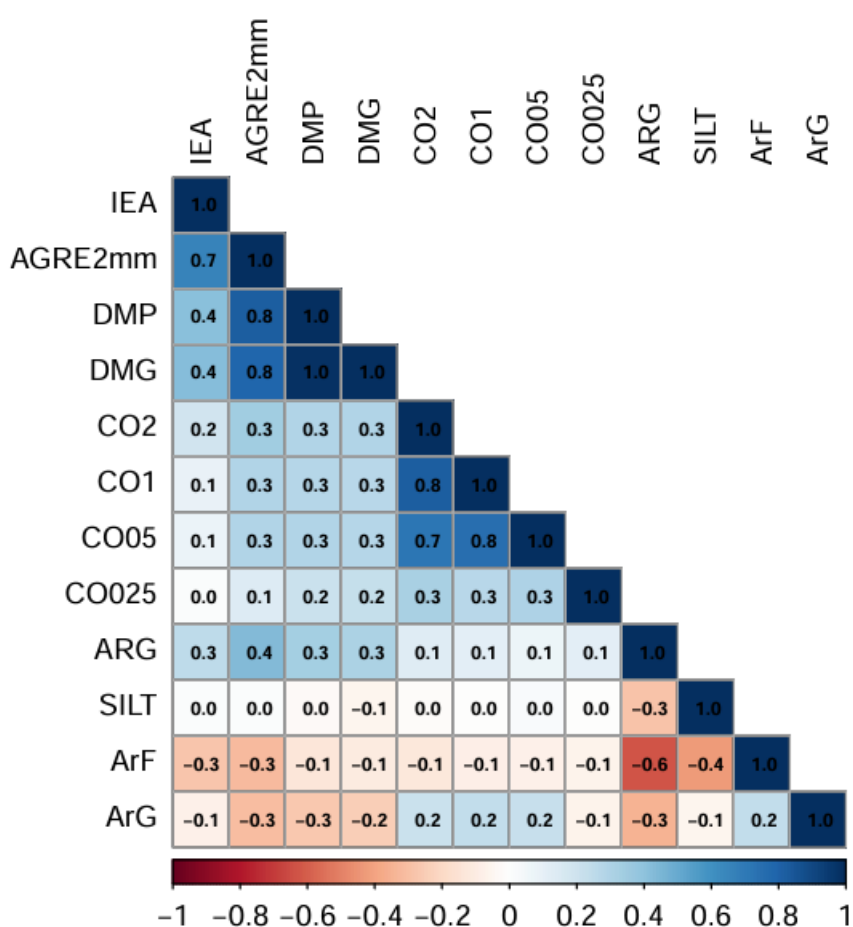
Essas observações estão em acordo com estudos como o de Six et al. (2002), que destacam que frações finas (<0,25 mm) podem conter formas mais lábeis de carbono, suscetíveis à rápida mineralização em solos sob manejo intensivo. Dessa forma, os resultados obtidos sugerem que, embora o plantio direto (T2) apresente menores teores de carbono nos microagregados, há indícios de que parte desse carbono esteja sendo translocado e estabilizado em macroagregados mais resistentes, contribuindo para a melhoria da qualidade estrutural do solo no longo prazo.

3.3 Matriz de correlação

A Figura 3 apresenta uma análise de correlação de Pearson, mostrando as relações entre os atributos físicos e químicos do solo. Essa matriz permite identificar quais variáveis estão mais fortemente associadas à estabilidade dos agregados e ao teor de carbono orgânico nas diferentes frações avaliadas. A seguir, são destacados os principais coeficientes de correlação obtidos.

Apresenta-se a matriz de correlação entre os atributos físicos e químicos do solo, conforme Figura 3.

Figura 3 - Matriz de correlação entre diferentes variáveis físicas e químicas do solo ¹.



1 Legenda: IEA= Índice de Estabilidade de Agregados; AGRE 2mm = Agregados maiores que 2 mm; DMP= Diâmetro Médio Ponderado; DMG= Diâmetro Médio Geométrico; CO2 = Carbono Orgânico peneira 2mm; CO1= Carbono Orgânico peneira 1mm; CO05 =Carbono Orgânico peneira 0,5mm; CO025= Carbono Orgânico peneira 0,25mm; ARG = Argila; SILT = Silte; ArF = Areia fina; ArG = Areia grossa

A matriz de correlação entre os atributos físicos e químicos do solo (Figura 3) revela importantes inter-relações entre as variáveis associadas à estabilidade e estrutura dos agregados. Observa-se uma forte correlação positiva entre o Índice de Estabilidade de Agregados (IEA) e

a porcentagem de agregados maiores que 2 mm (AGRE2mm), com coeficiente de 0,7. Isso indica que a presença de macroagregados está diretamente associada à maior estabilidade estrutural do solo. Além disso, tanto o Diâmetro Médio Ponderado (DMP) quanto o Diâmetro Médio Geométrico (DMG) apresentaram correlação positiva com o IEA e correlação muito forte com a variável AGRE2mm, evidenciando que solos com agregados maiores tendem a apresentar maior resistência à desagregação.

As frações de carbono orgânico também demonstraram influência positiva sobre os atributos físicos do solo. O carbono orgânico total (CO₂) e suas frações mais estáveis (CO₁ e CO₀₅) mostraram correlações positivas com AGRE2mm, DMP e DMG, embora com coeficientes de magnitude moderada. Isso sugere que a matéria orgânica, especialmente em formas mais recalcitrantes, contribui para a formação e estabilidade dos agregados, ainda que não atue isoladamente.

Por outro lado, as frações de areia, tanto fina (ArF) quanto grossa (ArG), apresentaram correlações negativas com os atributos estruturais do solo, com destaque para ArF, que se correlacionou negativamente com AGRE2mm (-0,3) e IEA (-0,1). Esses resultados indicam que solos com maior teor de areia tendem a apresentar menor estabilidade estrutural, o que pode estar relacionado à menor coesão entre as partículas e à menor capacidade de retenção de matéria orgânica.

No geral, os resultados da matriz de correlação destacam o papel fundamental da matéria orgânica e da textura fina (argila) na formação e manutenção da estrutura do solo e na estabilidade de agregados. Os sistemas de manejo que favorecem o acúmulo de carbono e a preservação da macroestrutura, como observado nos tratamentos com maior teor de macroagregados e maiores diâmetros médios, tendem a promover melhores condições físicas para o solo, reduzindo a suscetibilidade à erosão e melhorando a qualidade edáfica.

4 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo evidenciam que os diferentes sistemas de manejo do solo influenciam de forma significativa a estabilidade de agregados e o teor de carbono orgânico em Latossolos do Cerrado, sobretudo nas camadas superficiais. O sistema de plantio direto (T2) apresentou desempenho superior em todos os atributos avaliados, destacando-se pelo maior índice de estabilidade de agregados (IEA), pela maior proporção de macroagregados (>2 mm), pelos valores mais elevados de diâmetro médio ponderado (DMP) e geométrico (DMG), além dos maiores teores de carbono orgânico em todas as frações de agregados.

Um achado relevante foi o fato de o plantio direto ter superado, em alguns parâmetros de carbono orgânico total (COT), até mesmo o cerrado nativo (T1). Essa diferença pode estar associada à baixa deposição anual de resíduos característica do cerrado, enquanto os sistemas cultivados, quando bem manejados, favorecem maior acúmulo e proteção da matéria orgânica. O cultivo convencional (T3), embora inferior ao plantio direto, apresentou desempenho estrutural e químico ligeiramente superior ao observado no sistema sob pivô central (T4).

O carbono orgânico total (COT) demonstrou ser um indicador sensível e eficiente para avaliar a qualidade do solo, especialmente quando analisado em conjunto com parâmetros estruturais, como IEA, DMP e DMG. Ressalta-se, entretanto, que o COT, isoladamente, não expressa toda a complexidade da qualidade do solo, sendo necessário considerá-lo de forma integrada com atributos físicos, químicos e biológicos. Ainda assim, sua forte correlação com a estabilidade dos agregados e com a proporção de macroagregados valida seu uso como um indicador-chave para monitorar a qualidade de Latossolos em sistemas tropicais.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, M. I. *Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais*. 2008. 89 f. Dissertação (Mestrado em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008. Disponível em: <https://bibliotecasemiarios.ufv.br/jspui/handle/123456789/2412>. Acesso em: 05 fev. 2025.
- AGUIAR, M. I. *Agregação do solo em sistemas agroflorestais e convencionais*. 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/12345>. Acesso em: 06 fev. 2025.
- BAYER, C. *et al.* Influência do sistema de preparo e da rotação de culturas na qualidade da matéria orgânica do solo e no estoque de carbono em Latossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 675–687, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/9h7X9r6/?lang=pt>. Acesso em: 06 fev. 2025.
- EMBRAPA. *O cerrado e a agricultura: sucesso da ciência, desafio para sustentabilidade*. Brasília, DF: Embrapa, 2017.
- EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 573 p.
- FREITAS, P. L. de. *Plantio direto: fundamentos e perspectivas*. 3. ed. Londrina: IAPAR, 2019.
- GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (ed.). *Methods of Soil Analysis: Part 1 – Physical and Mineralogical Methods*. 2. ed. Madison: ASA – SSSA, 1986. p. 383–411. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003807178690015>. Acesso em: 20 fev. 2025.
- GODDARD, T. *et al.* *Conservation agriculture: the pathway to sustainable agriculture*. FAO, 2021.
- IBGE. *Geociências: solos do Brasil*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 18 maio 2025.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Geociências: solos do Brasil*. Rio de Janeiro, RJ, 2024. Portal. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 18 maio 2025.
- IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge: Cambridge University Press*, 2022. Portal. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acesso em: 28 fev. 2025.

LAL, R. Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. *Soil Science and Plant Nutrition*, v. 66, n. 1, p. 1–9, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1718548>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00380768.2020.1718548>. Acesso em: 05 mar. 2025.

SÁ, J. C. M. *et al.* *Sistema plantio direto no Brasil: fundamentos e aplicações*. 2. ed. Londrina: APDC, 2010.

SALTON, J. C. *et al.* Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 11–21, jan./fev. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/7LCR3R4yQ5cHt9sD7N7yk8k>. Acesso em: 21 mar. 2025.

SALTON, J. *et al.* Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob integração lavoura-pecuária. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 1411–1419, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400025>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/3qPY7ZD8vzYK9PMmFkQ7xNn>. Acesso em: 20 mar. 2025.

SANTOS, H. G. *et al.* *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SILVA, R. F. *et al.* Agregação do solo e estabilidade de agregados em áreas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 54, e00544, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2019.v54.00544>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2019.v54.00544>. Acesso em: 20 mar. 2025.

SILVA, C. A. *et al.* Carbono orgânico do solo como indicador de qualidade e sustentabilidade em sistemas agrícolas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 38, p. 1549–1561, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000500002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/YnhrMNQbbmD69c8nzqGhY7x>. Acesso em: 05 mar. 2025.

SILVA, C. A.; MIELNICZUK, J. Ação da matéria orgânica nas propriedades físicas do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 7–12, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831997000300013>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/TVKd3SYnzz0wHF2N5cCymdg>. Acesso em: 8 fev. 2025.

SOUZA, R. A. *et al.* Agregação e carbono em Latossolos sob diferentes sistemas de uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 40, e0150101, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150101>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/6q7t4ZL7gJmMdWbfHGj7yHS>. Acesso em: 05 fev. 2025.

SIX, J. *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, [s.l.], v. 241, p. 155–176, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1016125726789>. Acesso em: 8 mar. 2025.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, [s.l.], v. 33, p. 141–163, 1982. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>. Acesso em: 8 mar. 2025.

TORMENA, C. A. *et al.* Quantificação da estabilidade de agregados e sua relação com os teores de carbono orgânico e matéria orgânica de Latossolos sob diferentes sistemas de uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 541–549, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200001>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/qKLqBr6LKx9VKrbnGLFfWcq>. Acesso em: 28 set. 2025.