



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

JESSICA CRISTINA FERREIRA

**ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E ESTOQUE DE CARBONO EM SOLOS DE
UMA TOPOSSEQUENCIA SOB REGENERAÇÃO NATURAL NO TRIÂNGULO
MINEIRO**

UBERLÂNDIA – MG

2026

JESSICA CRISTINA FERREIRA

**ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E ESTOQUE DE CARBONO EM SOLOS DE
UMA TOPOSSEQUENCIA SOB REGENERAÇÃO NATURAL NO TRIÂNGULO
MINEIRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos do Programa de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Prof. Dr. José Luiz Rodrigues Torres

UBERLÂNDIA – MG

2026

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

F383a Ferreira, Jessica Cristina, 1998-
2026 Atributos físicos, químicos e estoque de carbono em solos de uma
 topossequência sob regeneração natural no Triângulo Mineiro [recurso
 eletrônico] / Jessica Cristina Ferreira. -- 2026.

 Orientador: José Luiz Rodrigues Torres.
 Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-graduação em Agronomia.
 Modo de acesso: Internet.
 Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.11027>
 Inclui bibliografia.
 Inclui ilustrações.

 1. Agronomia. I. Torres, José Luiz Rodrigues, 1965-, (Orient.). II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em
Agronomia. III. Título.

CDU: 631

André Carlos Francisco
Bibliotecário(a)-Documentalista - CRB-6/3408



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Secretaria da Coordenação do Programa de Pós-Graduação em
Agronomia
Rodovia BR 050, Km 78, Bloco 1CCG, Sala 206 - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP
38400-902
Telefone: (34) 2512-6715/6716 - www.ppgagro.iciag.ufu.br - posagro@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agronomia				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 006/2026, PPGAGRO				
Data:	Vinte e um de maio de dois mil e vinte e seis	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:27
Matrícula do Discente:	12412AGR008				
Nome do Discente:	Jéssica Cristina Ferreira				
Título do Trabalho:	Atributos físicos e químicos em uma topossequência sob regeneração natural à 25 anos				
Área de concentração:	Produção Vegetal				
Linha de pesquisa:	Uso e Recuperação de Solos e Resíduos na Agricultura				

Reuniu-se na sala 1CCG 212A - Campus Glória, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: Josef Gastl Filho - UEMG; Araína Hulmann Batista - UFU; Beno Wendling - UFU e José Luiz Rodrigues Torres - IFTM - orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr. José Luiz Rodrigues Torres, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, 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 senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

APROVADA

Essa dissertação possui mérito para ser indicada como destaque do Programa? (
x) SIM NÃO ()

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 **Beno Wendling, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/05/2026, às 16:27, 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 **Araína Hulmann Batista, Professor(a) do Magistério Superior**, em 21/05/2026, às 16:28, 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 **José Luiz Rodrigues Torres, Usuário Externo**, em 22/05/2026, às 16:05, 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 **Josef Gastl Filho, Usuário Externo**, em 23/05/2026, às 10:02, 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 **7330672** e o código CRC **00FB2C6C**.

Referência: Processo nº 23117.033368/2026-90

SEI nº 7330672

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força, saúde, sabedoria e perseverança para enfrentar os desafios desta caminhada e concluir mais esta etapa da minha formação.

À minha família, pelo amor incondicional, apoio constante, compreensão e incentivo em todos os momentos, especialmente nos períodos mais difíceis desta trajetória acadêmica. Vocês foram meu alicerce e minha maior fonte de motivação. Ao meu namorado, pelo companheirismo, paciência, apoio emocional e incentivo durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua presença foi fundamental para que eu mantivesse a confiança e a determinação necessárias para chegar até aqui.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Luiz Rodrigues Torres, pela orientação, confiança, dedicação, ensinamentos e valiosas contribuições para o desenvolvimento desta pesquisa. Sua experiência e comprometimento foram essenciais para a construção deste trabalho e para meu crescimento profissional e acadêmico.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), por proporcionar uma formação de excelência e por oferecer as condições necessárias para o desenvolvimento desta pesquisa. Ao Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM), Campus Uberaba, por disponibilizar a área experimental, a infraestrutura e o suporte necessários para a realização desta pesquisa.

Aos servidores, técnicos, colaboradores e funcionários da UFU e do IFTM, que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução deste trabalho, sempre com dedicação, profissionalismo e disposição para auxiliar.

Aos colegas, amigos e companheiros de pesquisa, pela troca de experiências, conhecimentos, apoio e amizade ao longo desta jornada. Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade em participar da avaliação deste trabalho, pelas contribuições, sugestões e considerações apresentadas, que certamente enriqueceram esta pesquisa e contribuíram para o meu crescimento acadêmico e profissional.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, à qual agradeço pelo suporte financeiro concedido, fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para a concretização deste importante objetivo em minha vida.

FERREIRA, Jessica Cristina. **Atributos físicos, químicos e estoque de carbono em solos de uma topossequência sob regeneração natural no triângulo mineiro**. 2026, 76 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos) – Universidade Federal de Uberlândia. 2026.

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar os atributos físicos e químicos do solo, bem como quantificar o teor e o estoque de carbono orgânico em diferentes classes de solo ao longo de uma topossequência na região do Triângulo Mineiro, no município de Uberaba, visando compreender a variabilidade espacial e vertical desses atributos, bem como suas inter-relações na qualidade do solo. A topossequência estudada apresenta aproximadamente 1.000 m de extensão. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, em parcelas subdivididas, com cinco classes de solo: Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Cambissolo (CA), Gleissolo Háptico (GH) e Gleissolo Melânico (GM), e duas profundidades de amostragem: 0,00–0,10 e 0,10–0,20 m, com cinco repetições. Foram avaliados atributos físicos do solo, incluindo densidade, macro e microporosidade, porosidade total e estabilidade e distribuição de agregados, além de atributos químicos relacionados à fertilidade, como pH, macro e micronutrientes. Também foram determinados os teores de carbono orgânico total (COT) e o estoque de carbono (EstC) do solo. Os dados foram submetidos à análise estatística para identificação de diferenças entre solos, profundidades e suas interações. Os resultados demonstraram que os solos hidromórficos, especialmente o GM, apresentaram maiores teores e EstC orgânico, associados à maior saturação hídrica e menor decomposição da matéria orgânica. Em contraste, Latossolos (LV e LVA) e Cambissolo, localizados em posições mais elevadas e bem drenadas, apresentaram menores EstC e melhores condições estruturais. Conclui-se que o relevo exerce papel determinante na distribuição dos atributos físicos, químicos e do carbono ao longo da topossequência, destacando a importância dessa abordagem para o manejo sustentável dos solos e o planejamento do uso da terra.

Palavras-chave: solos tropicais, densidade e porosidade, agregação, carbono orgânico, fertilidade do solo.

FERREIRA, Jessica Cristina. **Atributos físicos, químicos e estoque de carbono em solos de uma toposequencia sob regeneração natural no triângulo mineiro.** 2026, 76 f. Dissertation (Master's in Agronomy/Soils) – Federal University of Uberlândia. 2026.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the physical and chemical attributes of soil, as well as to quantify the total organic carbon content and carbon stock in different soil classes along a toposequence in the *Triângulo Mineiro* region, in the municipality of *Uberaba, Minas Gerais*, Brazil, in order to understand the spatial and vertical variability of these attributes and their interrelationships in soil quality. The studied toposequence was approximately 1,000 m long. The experimental design was a randomized complete block design with a split-plot arrangement, consisting of five soil classes: Oxisol (LV), Red-Yellow Oxisol (LVA), Cambisol (CA), Haplic Gleysol (GH), and Melanic Gleysol (GM), and two sampling depths (0.00–0.10 and 0.10–0.20 m), with five replicates. Physical soil attributes were evaluated, including bulk density, macro- and microporosity, total porosity, and aggregate stability and distribution, as well as chemical attributes related to soil fertility, such as pH and macro- and micronutrient contents. Total organic carbon (TOC) content and soil organic carbon stock (SOC stock) were also determined. The data were subjected to statistical analysis to identify differences among soil classes, sampling depths, and their interactions. The results showed that the hydromorphic soils, particularly the Melanic Gleysol (GM), presented higher total organic carbon contents and soil organic carbon stocks, which were associated with greater water saturation and lower rates of organic matter decomposition. In contrast, the Oxisols (LV and LVA) and the Cambisol (CA), located in higher and well-drained landscape positions, exhibited lower soil organic carbon stocks and better structural conditions. It was concluded that topography plays a decisive role in the distribution of the physical, chemical, and carbon-related attributes along the toposequence, highlighting the importance of this approach for sustainable soil management and land-use planning.

Keywords: tropical soils; bulk density and porosity; soil aggregation; soil organic carbon; soil fertility.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Uso atual dos 136 hectares da área em estudo no IFTM campus Uberaba, em março/2002.	27
Tabela 2 – Análises químicas e texturais do Latossolo Vermelho (P1), Latossolo Vermelho-Amarelo (P2), Cambissolo (P3), Gleissolo Háptico (P4) e Gleissolo Melânico (P5) da argila total dos horizontes superficiais dos perfis estudados.	30
Tabela 3 – Valores de densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (PT) e relação entre Ma/PT, em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025.	36
Tabela 4 – Desdobramentos das interações significativas da macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (PT) e relação entre Ma/PT, em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025.	39
Tabela 5 – Distribuição dos agregados por classes do diâmetro, no Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Cambissolo (CA), Gleissolo Háptico (GH) e Melânico (GM), em Uberaba, MG, 2025.	43
Tabela 6 – Desdobramento das interações significativas da distribuição dos agregados por classes do diâmetro, no Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Cambissolo (CA), Gleissolo Háptico (GH) e Melânico (GM), em Uberaba, MG, 2025.	45
Tabela 7 – Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice de estabilidade de agregados (IEA) e porcentagem de agregados com diâmetro superior a 2 mm (AGRI), em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025.	49
Tabela 8 – Desdobramento das interações significativas do diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice de estabilidade de agregados (IEA) e porcentagem de agregados com diâmetro superior a 2 mm (AGRI), em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025.	51
Tabela 9 – Valor do potencial hidrogeniônico (pH), teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), alumínio (Al), hidrogênio + alumínio (H + Al) e matéria orgânica (MO), em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025.	55
Tabela 10 – Desdobramento das interações do potencial hidrogeniônico (pH), teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), alumínio (Al), hidrogênio + alumínio (H + Al) e matéria orgânica (MO), em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025.	59

Tabela 11 – Teores de manganês (Mn), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe) e zinco (Zn) em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025.....	61
---	----

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização da unidade amostral na área de estudos localizada no município de Uberaba, MG	26
Figura 2 – Área total de 472 hectares do Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) Campus Uberaba, com destaque em vermelho para a microbacia de 136 hectares onde o estudo foi realizado.	27
Figura 3 – Topossequência destacando os locais onde foram abertas trincheiras e coletadas amostras no Latossolo Vermelho (P1), Latossolo Vermelho-Amarelo (P2), Cambissolo (P3), Gleissolo Háptico (P4) e Gleissolo Melânico (P5) do IFTM) Campus Uberaba	29
Figura 4 – O anel volumétrico de aço foi cravado no solo de 0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m de profundidade com o trado de Uhland, para coleta de amostra de solo indeformada, em Uberaba, MG, 2024.	31
Figura 5 – Anéis volumétricos sendo saturados por 24 horas, depois serem colocados em mesa de tensão a 0,60 m de altura de coluna de água, no Laboratório de Física do Solo do IFTM Campus Uberaba, MG.....	31
Figura 6 – Aparelho de Yooder de oscilação vertical para determinação de estabilidade de agregados, em peneiras com malha de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 e 0,106 mm	33

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO	16
2.2 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	25
3.1.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA	25
3.1.2 TIPO DE SOLO	28
3.1.3 CLIMA DA REGIÃO	29
3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	30
3.3 ATRIBUTOS FÍSICOS AVALIADOS	30
3.3.1 DENSIDADE E POROSIDADE DO SOLO	30
3.3.2 AGREGAÇÃO DO SOLO	32
3.4 ATRIBUTOS QUÍMICOS	34
3.4.1 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS DE SOLO	34
3.4.2 CARBONO ORGÂNICO TOTAL E ESTOQUE DE CARBONO	34
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
6 CONCLUSÃO.....	69
REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

O estudo dos solos em topossequências constitui uma importante abordagem na Ciência do Solo, pois possibilita compreender, de forma integrada, como o relevo condiciona os processos pedogenéticos, a dinâmica hídrica e a distribuição espacial dos atributos físicos, químicos e do carbono orgânico ao longo da paisagem. Em ambientes tropicais, essa variabilidade é particularmente expressiva devido à intensa atuação dos fatores de formação do solo, resultando em contrastes marcantes entre posições de vertente quanto à estrutura, densidade, porosidade, fertilidade e capacidade de armazenamento de carbono (Santos, 2018).

No que se refere aos atributos físicos, a organização dos solos em topossequência exerce influência direta sobre a densidade e a porosidade do solo. As posições mais elevadas da vertente, geralmente associadas a melhor drenagem e maior estabilidade estrutural, tendem a apresentar menores valores de densidade e maior proporção de macroporos, favorecendo a aeração e a infiltração de água. Em contrapartida, as posições intermediárias e inferiores acumulam maior teor de água, apresentam aumento da microporosidade e, frequentemente, maior densidade aparente, refletindo condições de drenagem restrita e maior suscetibilidade à compactação (Fontana *et al.*, 2021).

Associada à porosidade, a agregação do solo representa um atributo físico-chave para a qualidade estrutural, sendo diretamente influenciada pela textura, pelo teor de matéria orgânica e pelas condições de manejo. A análise da distribuição de agregados em diferentes classes de peneiras fornece subsídios para compreender a resistência do solo à desagregação, à erosão e à compactação. Índices como o diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG) permitem quantificar o tamanho médio dos agregados, enquanto o índice de estabilidade de agregados e a proporção de agregados > 2 mm expressam a qualidade estrutural e a capacidade do solo de manter sua organização frente a agentes físicos externos (Ribeiro *et al.*, 2019; Wendling *et al.*, 2005).

Além dos atributos físicos, os atributos químicos do solo também apresentam variação significativa ao longo da topossequência, condicionada pela dinâmica de lixiviação, acúmulo de materiais e posição no relevo. A distribuição de macro e micronutrientes é influenciada pela mineralogia, pelo regime hídrico e pelo histórico de uso do solo. Em posições mais elevadas, a maior drenagem pode intensificar a perda de nutrientes por lixiviação, enquanto nas posições mais baixas ocorre, frequentemente, o acúmulo de bases e micronutrientes, associado à deposição de materiais transportados ao longo da vertente. Essas diferenças químicas condicionam a fertilidade dos solos e sua aptidão agrícola (Novais *et al.*, 2007; Brady; Weil, 2013).

Nesse contexto, o carbono orgânico total (COT) constitui um elemento central na integração entre os atributos físicos e químicos do solo. O COT contribui para a melhoria da estrutura, favorece a formação e a estabilização dos agregados, reduz a densidade do solo e aumenta a porosidade, especialmente a macroporosidade, promovendo melhores condições de aeração e infiltração. Em solos tropicais, que apresentam baixa fertilidade natural, o carbono orgânico assume função estratégica na manutenção da qualidade física e química, influenciando diretamente a disponibilidade de nutrientes e a atividade biológica (Ribeiro *et al.*, 2019).

A análise do estoque de carbono orgânico (EstC) ao longo de topossequências revela padrões associados à drenagem, à profundidade efetiva do solo e às condições de hidromorfismo. Em posições mais baixas da vertente, sujeitas à saturação hídrica periódica ou permanente, a redução da disponibilidade de oxigênio pode diminuir a atividade microbiana aeróbia e retardar a decomposição da matéria orgânica, favorecendo o acúmulo e a preservação do carbono no solo. Em contraste, posições mais elevadas e bem drenadas apresentam maior aeração, o que favorece a mineralização da matéria orgânica e pode resultar em menores estoques de carbono (Santos *et al.*, 2018; Lavalley; Soong; Cotrufo, 2020).

A região do Triângulo Mineiro, caracterizada por relevos suaves e expressiva diversidade pedológica ao longo das vertentes, apresenta grande importância agrícola. Nessa região, a dinâmica da água no solo e a capacidade de armazenamento de carbono são fortemente influenciadas pelos diferentes sistemas de manejo adotados nas últimas décadas. A compreensão integrada desses fatores é essencial para o planejamento do uso da terra e para a conservação dos recursos naturais.

Diante desse contexto, torna-se necessário compreender como os atributos físicos, químicos e o carbono orgânico do solo se distribuem e se inter-relacionam ao longo da topossequência. Assim, a realização deste estudo justifica-se pela necessidade de uma caracterização integrada dos solos, considerando a interdependência entre esses atributos. Essa abordagem fornece subsídios técnicos para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes de manejo agrícola, conservação do solo e recuperação de áreas degradadas, além de contribuir para políticas ambientais e climáticas.

A hipótese deste estudo é de que a regeneração natural promove melhorias nos atributos físicos e químicos do solo, porém com respostas distintas entre as classes de solo ao longo da topossequência.

Objetivou-se, no presente estudo avaliar os atributos físicos e químicos do solo e quantificar o teor e o estoque de carbono orgânico em diferentes classes de solo ao longo de uma topossequência na região do Triângulo Mineiro, no município de Uberaba, com o intuito

de compreender a variabilidade espacial e vertical desses atributos e suas inter-relações na qualidade do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Atributos físicos do solo

O estudo dos atributos físicos do solo em ambientes organizados em topossequência constitui uma abordagem essencial para compreender de que maneira o relevo influencia os processos de formação, organização estrutural e funcionamento dos solos ao longo da paisagem. A posição topográfica condiciona o regime hídrico, a redistribuição de partículas e solutos, bem como a intensidade dos processos pedogenéticos atuantes. Como resultado, observam-se variações sistemáticas nos atributos físicos ao longo da vertente. Assim, a análise integrada desses atributos possibilita interpretar a dinâmica edáfica, reconhecer limitações naturais e orientar práticas de manejo compatíveis com a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e ambientais (Fontana *et al.*, 2021; Brito Filho, 2023).

Nesse contexto, a densidade do solo destaca-se como um dos principais indicadores da qualidade física, pois expressa o grau de compactação e o arranjo das partículas minerais e orgânicas no espaço poroso. Valores elevados desse atributo indicam maior grau de adensamento, condição que restringe a infiltração de água, reduz a aeração e impõe barreiras ao crescimento radicular. Em topossequências, verifica-se que a densidade varia conforme a posição na vertente e a profundidade do perfil. Essa variação resulta tanto a atuação de processos naturais quanto do histórico de uso e manejo do solo (Brady; Weil, 2013).

Ao longo do perfil do solo, a tendência de aumento da densidade em profundidade está frequentemente associada à redução do teor de matéria orgânica, à menor atividade biológica e ao efeito do peso exercido pelas camadas superiores. Nos Latossolos, Cambissolos e Gleissolos Háplicos avaliados, esse comportamento evidencia um padrão pedogenético recorrente. A camada superficial apresenta estrutura física mais favorável, enquanto as camadas subsuperficiais tendem a maior adensamento natural, que não necessariamente configura impedimento severo ao desenvolvimento radicular (Reinert *et al.*, 2008).

A densidade do solo mantém relação direta com a macroporosidade, atributo fundamental para o movimento de água e ar no perfil. A presença adequada de macroporos favorece a drenagem, a difusão gasosa e a respiração das raízes, sendo especialmente relevante em sistemas agrícolas. Em posições mais elevadas da topossequência, onde os solos apresentam melhor drenagem natural, observa-se maior proporção de macroporos. Esse padrão reflete condições estruturais mais favoráveis ao crescimento vegetal e à atividade biológica do solo (Taylor; Aschcroft, 1972).

Em contraste, nos solos hidromórficos situados nas posições mais baixas da vertente, como os Gleissolos, a macroporosidade tende a ser reduzida, sobretudo em maiores

profundidades. Essa diminuição está associada à saturação hídrica frequente, que limita a reorganização estrutural e favorece o colapso de macroporos. Como consequência, esses ambientes apresentam maior suscetibilidade à deficiência de oxigênio no solo. Essa condição influencia diretamente os processos biológicos e o desenvolvimento do sistema radicular (Fontana *et al.*, 2021).

Associada à macroporosidade, a microporosidade desempenha papel fundamental na retenção de água disponível às plantas. Os microporos são responsáveis por armazenar água contra a ação da gravidade, assegurando suprimento hídrico durante períodos de déficit. Em solos localizados nas posições intermediárias e inferiores da topossequência, observa-se aumento relativo da microporosidade. Esse comportamento reflete a maior proporção de poros de menor diâmetro e a influência da saturação hídrica prolongada (Kiehl, 1979).

Entretanto, o excesso de microporos preenchidos por água pode comprometer a aeração do solo, criando condições anaeróbias desfavoráveis à maioria das culturas agrícolas. Nos Gleissolos Melânicos, essa situação torna-se particularmente evidente, uma vez que a saturação constante limita a difusão de oxigênio no perfil. Tal condição altera a dinâmica dos processos físicos, químicos e biológicos do solo, exigindo atenção especial no planejamento do uso e manejo dessas áreas (Fontana *et al.*, 2021).

A porosidade total, resultante da soma entre macro e microporos, expressa a capacidade global do solo em armazenar simultaneamente água e ar. Solos com elevada porosidade total apresentam estrutura física mais equilibrada, maior resiliência à compactação e maior eficiência na condução de fluxos hídricos. Na topossequência estudada, os valores de porosidade total foram considerados adequados. Esse resultado indica que, apesar das diferenças entre classes de solo e profundidades, não houve limitação física severa ao desenvolvimento radicular (Braga *et al.*, 2015).

A análise da relação entre macroporosidade e porosidade total constitui um importante indicador da qualidade estrutural do solo. Valores próximos ou superiores a um terço da porosidade total são considerados ideais para garantir equilíbrio entre aeração e retenção de água. Nos solos avaliados, essa relação variou conforme a classe pedológica e a profundidade. Essa variação reflete a influência conjunta da pedogênese, da textura e do regime hídrico ao longo da vertente (Taylor; Aschcroft, 1972).

A compreensão da porosidade do solo conduz, de forma integrada, à análise da agregação, uma vez que o tamanho e a estabilidade dos agregados determinam o arranjo dos poros e a resistência do solo à ação da água. A agregação resulta da interação entre partículas

minerais, matéria orgânica e agentes cimentantes, processo influenciado pelo ambiente de formação do solo e condições de drenagem predominantes (Ribeiro *et al.*, 2019).

A distribuição dos agregados por classes de diâmetro evidencia a predominância de agregados maiores nos Latossolos e Cambissolos, indicando elevada estabilidade estrutural. A maior retenção de material na peneira de 2,0 mm demonstra resistência à desagregação em água. Essa característica é típica de solos altamente intemperizados e ricos em óxidos de ferro, os quais atuam como importantes agentes estabilizantes da estrutura (Giácomo *et al.*, 2015). Em contraste, os Gleissolos apresentaram maior proporção de agregados finos, especialmente nas classes de menor diâmetro. Esse comportamento está associado à saturação hídrica frequente, que limita a formação de ligações estáveis entre as partículas. Além disso, tal condição favorece processos de desagregação estrutural. Dessa forma, o regime hídrico assume papel central na diferenciação estrutural dos solos ao longo da topossequência (Fushimi *et al.*, 2020).

A partir da distribuição dos agregados, o Diâmetro Médio Ponderado (DMP) permite quantificar o tamanho médio dos agregados, atribuindo maior peso às classes de maior diâmetro. Valores elevados do DMP, observados principalmente nas camadas superficiais dos solos bem drenados, indicam estrutura mais estável. Essa condição está associada à maior resistência à erosão hídrica, sendo favorável à sustentabilidade do uso agrícola e à conservação do solo (Wendling *et al.*, 2005).

De forma complementar, o Diâmetro Médio Geométrico (DMG) fornece uma estimativa mais sensível à presença de agregados menores, permitindo avaliar a homogeneidade da estrutura do solo. A redução do DMG em profundidade reflete a diminuição da atividade biológica e do aporte de resíduos orgânicos. Esse padrão é consistente com a dinâmica observada nos solos da topossequência estudada, evidenciando a influência da profundidade nos processos estruturais (Demarchi; Perusi; Piroli, 2011).

O Índice de Estabilidade de Agregados (IEA) expressa a resistência dos agregados à desintegração em água, configurando-se como um indicador direto da qualidade estrutural do solo. Valores elevados de IEA indicam maior capacidade do solo de manter sua estrutura frente à ação da água e de agentes erosivos, refletindo melhores condições físicas e maior resistência à degradação estrutural. Por outro lado, menores valores de IEA estão associados à maior susceptibilidade à desagregação e à deterioração da estrutura do solo (Le Bissonnais, 1996; OADES, 1984).

Por fim, o Índice Agri, que representa a porcentagem de agregados com diâmetro superior a 2 mm, reforça as diferenças estruturais entre os solos ao longo da vertente. Valores

elevados desse índice indicam predominância de macroagregados, favorecendo a infiltração de água e a resistência à erosão. A redução do Índice Agri nos Gleissolos confirma que a saturação hídrica compromete a estabilidade estrutural, encerrando de forma integrada a interpretação dos atributos físicos avaliados na topossequência (Ribeiro *et al.*, 2019).

2.2 Atributos químicos do solo

Os atributos químicos do solo exercem papel fundamental na definição da fertilidade, no comportamento bioquímico e na dinâmica dos nutrientes essenciais ao crescimento vegetal, sendo diretamente influenciados pelos processos pedogenéticos e pelas variações topográficas presentes em topossequências. Em ambientes tropicais altamente intemperizados, como os do Cerrado e do Triângulo Mineiro, predominam solos com baixos teores de bases trocáveis, elevada acidez e forte capacidade de adsorção de fósforo. Esses fatores impõem limitações naturais importantes à produtividade e exigem análises integradas ao relevo para correta interpretação da fertilidade. A compreensão dessas características permite estabelecer relações entre evolução pedológica, estrutura do solo e capacidade de suporte às atividades agrícolas (Giácomo *et al.*, 2015).

Nas posições mais elevadas da topossequência, como nos Latossolos, o elevado grau de intemperismo promove intensa remoção de nutrientes por lixiviação, resultando em perfis profundos, bem drenados e com baixos teores de cálcio, magnésio e potássio. Esses solos apresentam alta concentração de óxidos de ferro e alumínio, responsáveis pela forte adsorção de fósforo, reduzindo sua disponibilidade mesmo após fertilização. Portanto, a posição topográfica influencia diretamente a composição química e a fertilidade intrínseca dos solos. Essa condição exige estratégias de manejo específicas para cada posição da paisagem (Pereira; Pereira, 2024).

Diferentemente, nas posições intermediárias e inferiores da vertente, os solos apresentam condições químicas distintas, principalmente devido ao maior acúmulo de água e matéria orgânica em ambientes de drenagem restrita. Nos Gleissolos, a decomposição orgânica ocorre de forma mais lenta, favorecendo a preservação de carbono orgânico e, consequentemente, maior retenção de nutrientes. Essa dinâmica altera significativamente a disponibilidade de nitrogênio e enxofre, cuja liberação depende da mineralização da matéria orgânica. Assim, a variabilidade química ao longo da topossequência reflete diretamente a influência dos regimes hídricos (Rosa; Soares Neto, 2020).

A matéria orgânica exerce papel central na melhoria da fertilidade química do solo, pois contribui para a geração de cargas negativas responsáveis pelo aumento da capacidade de troca catiônica. Esse efeito favorece a retenção de nutrientes como cálcio, magnésio, potássio e micronutrientes. Em solos tropicais pobres em argila de alta atividade, como os Latossolos, essa contribuição torna-se ainda mais relevante, pois a matéria orgânica representa a principal fonte de cargas. A maior presença desse material em áreas de baixada influencia diretamente a manutenção da qualidade química dos solos (Freitas *et al.*, 2018).

O fósforo apresenta comportamento particularmente complexo em solos tropicais, devido à forte capacidade de fixação exercida pelos óxidos de ferro e alumínio. Nas posições de topo, onde o solo é mais intemperizado, essa fixação é mais intensa, reduzindo sua mobilidade e aproveitamento pelas plantas. Em áreas hidromórficas, processos redutivos podem modificar temporariamente a solubilidade do ferro, influenciando a dinâmica do fósforo. Contudo, esse efeito tende a ser restrito às camadas superficiais, tornando indispensável a análise do relevo na interpretação da fertilidade fosfatada (Martins, 2024).

O potássio, por sua vez, é altamente móvel no solo e apresenta estreita relação com a textura e a capacidade de retenção das frações coloidais. Em áreas arenosas situadas no topo da vertente, a lixiviação é mais intensa, reduzindo sua disponibilidade. Em posições com maior teor de argila e acúmulo de matéria orgânica, observa-se maior retenção e teores mais elevados desse nutriente. Essa variabilidade espacial evidencia a importância da análise integrada entre atributos químicos e físicos para definição de práticas de manejo adequadas (Mayer, 2024).

Os nutrientes cálcio e magnésio estão entre os mais afetados pelos processos de intemperismo e lixiviação em ambientes tropicais. Em Latossolos, seus baixos teores estão associados à intensa remoção por água percolante e à baixa proporção de cargas permanentes nos colóides. Em solos menos evoluídos, localizados em meia encosta ou baixada, os teores tendem a ser mais elevados, refletindo menor remoção e maior acúmulo de materiais transportados. Esse padrão evidencia a influência direta do relevo sobre a distribuição das bases trocáveis (Brito Filho, 2023).

Os micronutrientes ferro, manganês, zinco e cobre também apresentam distribuição condicionada pelas características hidrológicas da paisagem. Em áreas bem drenadas, o ferro permanece predominantemente em formas oxidadas de baixa solubilidade. Em ambientes hidromórficos, ocorre a redução do ferro e do manganês, aumentando temporariamente sua mobilidade e disponibilidade. Essa dinâmica pode resultar tanto em deficiência quanto em toxicidade, dependendo das condições locais e do manejo adotado (Simon *et al.*, 2019).

O pH do solo, indicador fundamental da acidez, apresenta variação expressiva ao longo da topossequência em função da drenagem, lixiviação e acúmulo de matéria orgânica. Nas posições superiores, a acidez tende a ser mais elevada devido à remoção de bases e à predominância de óxidos de ferro e alumínio. Em áreas de baixada, a decomposição mais lenta e a saturação hídrica podem amenizar temporariamente a acidez. Ainda assim, esses solos podem apresentar toxicidade por alumínio em determinadas condições (Costa *et al.*, 2020).

A saturação por bases, reconhecida como um indicador direto da fertilidade do solo, tende a apresentar valores reduzidos nas posições de topo e níveis mais elevados nas áreas de baixada, em função do acúmulo progressivo de nutrientes transportados ao longo da vertente. Em solos do Cerrado, esse atributo é, de modo geral, baixo devido ao intenso intemperismo químico, que promove a remoção de bases trocáveis. Diante desse cenário, torna-se indispensável a adoção de práticas corretivas, como a calagem, para restabelecer condições químicas adequadas. Nesse sentido, compreender a distribuição espacial desses atributos ao longo da paisagem é fundamental para evitar manejos inadequados e decisões agronômicas imprecisas (Cogo *et al.*, 2022).

A saturação por alumínio configura-se como um dos principais fatores limitantes da produtividade em solos tropicais altamente intemperizados. Nas posições mais elevadas do relevo, a lixiviação intensa favorece a predominância de formas solúveis de alumínio, comprometendo o desenvolvimento radicular e a absorção eficiente de água e nutrientes. Já em áreas com drenagem restrita, parte desse elemento pode ser parcialmente imobilizada, embora os riscos à atividade biológica persistam. Dessa forma, a compreensão desse atributo assume papel central no planejamento de estratégias eficientes de correção da acidez do solo (Troian *et al.*, 2020).

A matéria orgânica do solo desempenha função essencial na mitigação da toxidez por alumínio, uma vez que promove a formação de complexos estáveis que reduzem sua atividade química. Em ambientes sob regeneração natural, o aporte contínuo de resíduos vegetais favorece o aumento da capacidade de troca catiônica e a redução da acidez ativa. Esse processo contribui para a melhoria gradual da fertilidade química e da estrutura do solo. Assim, evidencia-se o papel estratégico das áreas preservadas na manutenção e recuperação da qualidade química dos solos tropicais (Almeida *et al.*, 2024).

Segundo Giácomo *et al.* (2015), a dinâmica do nitrogênio no solo está fortemente associada ao teor de matéria orgânica e às condições aeróbias ou anaeróbias presentes nas diferentes posições da topossequência. Em solos bem drenados, os processos de mineralização ocorrem de forma mais intensa, elevando a disponibilidade desse nutriente para as plantas. Em

contrapartida, ambientes hidromórficos favorecem a desnitrificação, reduzindo os teores disponíveis. Esses mecanismos demonstram a importância de uma análise integrada do ambiente para a interpretação adequada da dinâmica do nitrogênio.

O enxofre apresenta comportamento semelhante ao do nitrogênio, pois sua disponibilidade também está diretamente relacionada à mineralização da matéria orgânica. Em solos com elevado acúmulo orgânico, como os Gleissolos Melânicos, os teores desse nutriente tendem a ser mais elevados, refletindo o aporte constante de resíduos vegetais e a menor taxa de decomposição aeróbia. Além disso, o enxofre desempenha papel fundamental na síntese de aminoácidos e proteínas vegetais. Dessa forma, sua dinâmica reforça a importância da matéria orgânica na fertilidade dos solos (Freitas *et al.*, 2018).

A interação entre atributos químicos e físicos do solo determina grande parte de sua funcionalidade, especialmente no que se refere à retenção, mobilidade e disponibilidade de nutrientes. Solos mais porosos e bem oxigenados apresentam dinâmica química mais ativa, favorecendo processos de transformação e ciclagem dos elementos. Em contraste, ambientes saturados promovem condições redutoras que alteram significativamente a forma química e a disponibilidade dos nutrientes. Esses aspectos evidenciam a necessidade de análises integradas para uma avaliação adequada da fertilidade do solo (Martins *et al.*, 2025).

A variabilidade espacial dos atributos químicos pode ser eficientemente avaliada por meio de ferramentas geoestatísticas, que permitem identificar padrões, tendências e zonas de maior ou menor fertilidade ao longo da topossequência. Essas técnicas contribuem para o mapeamento detalhado da distribuição dos nutrientes e para a definição de práticas de manejo mais específicas. Em áreas caracterizadas por elevada heterogeneidade pedológica, tais abordagens promovem uma gestão mais racional e sustentável do solo. Assim, o uso dessas ferramentas amplia a eficiência do planejamento agrícola (Santos *et al.*, 2023).

Os atributos químicos do solo estão intimamente associados ao seu potencial de armazenamento de carbono orgânico, uma vez que a matéria orgânica influencia diretamente a capacidade de troca catiônica e a estabilidade dos agregados. Solos sob vegetação natural tendem a apresentar maiores teores de carbono e melhores condições químicas, refletindo equilíbrio nos processos edáficos. Esse comportamento destaca a importância da conservação ambiental em áreas sensíveis da paisagem. Dessa forma, evidencia-se a conexão direta entre fertilidade, carbono e sustentabilidade dos sistemas produtivos (Rocha, 2025).

O manejo inadequado do solo, especialmente em sistemas agrícolas intensivos, promove alterações expressivas em seus atributos químicos, resultando na redução da fertilidade e na aceleração da perda de carbono orgânico. A retirada da vegetação nativa e o revolvimento

frequente intensificam processos de lixiviação e acidificação. Como consequência, ocorre comprometimento da disponibilidade de nutrientes essenciais. Esses impactos reforçam a necessidade de adoção de estratégias conservacionistas voltadas à preservação da qualidade edáfica (Troian *et al.*, 2020).

A análise integrada dos atributos químicos ao longo da topossequência fornece subsídios fundamentais para o planejamento racional do uso da terra. Essa abordagem permite identificar potencialidades e limitações associadas a cada posição topográfica, orientando a adoção de práticas de manejo mais adequadas. Além disso, favorece a sustentabilidade dos sistemas produtivos ao alinhar o uso do solo às suas características ambientais. Assim, o conhecimento detalhado desses atributos contribui diretamente para a sustentabilidade agrícola em regiões tropicais (Pereira; Pereira, 2024).

O estoque de carbono no solo depende não apenas do teor presente, mas também da densidade e da profundidade consideradas na avaliação, fatores que determinam a quantidade total armazenada por unidade de área. Solos com menor densidade aparente apresentam maior volume e, conseqüentemente, maior potencial de acúmulo de carbono. Essa relação demonstra que o estoque é mais sensível às propriedades físicas do que ao teor isolado. Dessa forma, reforça-se a importância de análises integradas para interpretações mais precisas (Freitas *et al.*, 2018).

A quantificação do estoque de carbono ao longo de topossequências é essencial para avaliar o potencial de sequestro de carbono em diferentes ambientes. Essa análise permite identificar posições da paisagem com maior capacidade de acúmulo orgânico e maior relevância ambiental. Em áreas de Cerrado, solos profundos e ricos em matéria orgânica desempenham papel significativo na mitigação das mudanças climáticas. Assim, esses dados subsidiam estratégias conservacionistas e a definição de áreas prioritárias para preservação (Costa *et al.*, 2020).

Sistemas de manejo inadequados podem provocar reduções expressivas no teor e no estoque de carbono do solo, especialmente quando associados à queima, ao revolvimento intenso e à remoção da cobertura vegetal. A maior exposição do solo aumenta a oxigenação, acelerando a decomposição da matéria orgânica e a liberação de dióxido de carbono para a atmosfera. Dessa forma, práticas agrícolas convencionais intensivas figuram entre os principais fatores de perda de carbono. Esse cenário evidencia a urgência de práticas mais sustentáveis (Troian *et al.*, 2020).

Em contrapartida, sistemas conservacionistas, como o plantio direto, a integração lavoura-floresta e a recuperação de áreas degradadas, apresentam elevada eficiência na

promoção do aumento gradual do estoque de carbono. A manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo reduz a oxigenação excessiva, minimiza perdas por erosão e favorece a incorporação de matéria orgânica. Estudos demonstram que áreas manejadas de forma sustentável apresentam recuperação progressiva do estoque ao longo do tempo. Esses resultados reforçam os benefícios do manejo conservacionista (Cogo *et al.*, 2022).

Segundo Santos *et al.* (2023, p. 9), a análise da variabilidade espacial do carbono ao longo de topossequências pode ser significativamente aprimorada com o uso de ferramentas geoestatísticas. Esses métodos permitem identificar zonas de acúmulo ou deficiência e prever padrões espaciais de distribuição do carbono. A partir dessas informações, é possível orientar práticas de manejo diferenciadas conforme o relevo. Dessa forma, evita-se a generalização de estratégias que comprometam a eficiência do uso da terra.

A formação de horizontes orgânicos em áreas hidromórficas ocorre principalmente em função da baixa disponibilidade de oxigênio, que limita a atividade microbiana decompositora. Esse ambiente favorece o acúmulo de compostos orgânicos mais resistentes à degradação. Tais horizontes desempenham papel fundamental na retenção de água e nutrientes, contribuindo para a estabilidade ecológica da paisagem. A presença de carbono recalcitrante reforça a importância da preservação de ambientes úmidos (Almeida *et al.*, 2024).

Em regiões de transição ecológica, como áreas sob influência simultânea de Cerrado e Caatinga, a distribuição do carbono apresenta elevada variabilidade. Essa variação está diretamente associada à estrutura da vegetação e ao regime hídrico predominante. Ambientes com maior cobertura arbórea tendem a acumular mais carbono devido à deposição contínua de serapilheira e à proteção do solo. Assim, evidencia-se o papel central da vegetação na regulação da ciclagem do carbono (Rocha, 2025).

Conforme Ribeiro *et al.* (2019, p. 7), a estabilidade dos agregados do solo está diretamente relacionada ao teor de carbono orgânico, uma vez que substâncias húmicas atuam como agentes cimentantes. Esses compostos protegem a matéria orgânica da decomposição microbiana acelerada. Solos com agregados mais estáveis tendem a armazenar carbono por períodos mais longos e apresentam maior resistência à erosão. Essa relação é fundamental para compreender os processos de conservação do solo.

A matéria orgânica também exerce influência significativa sobre a disponibilidade de micronutrientes, atuando como agente quelante e regulando a dinâmica das cargas coloidais. Em solos tropicais, esse mecanismo é especialmente relevante para micronutrientes metálicos e para a redução da toxidez por alumínio. Dessa forma, a matéria orgânica contribui para

minimizar perdas e aumentar a eficiência nutricional. Esse comportamento evidencia o caráter multifuncional do carbono na melhoria da fertilidade química (Giácomo *et al.*, 2015).

O estoque de carbono no solo constitui um importante indicador ambiental para estimar a contribuição dos ecossistemas edáficos no sequestro de dióxido de carbono atmosférico. Em regiões com perfis profundos e condições favoráveis ao acúmulo orgânico, esse estoque pode aumentar ao longo dos anos. Em ambientes bem manejados, essa dinâmica contribui diretamente para a mitigação das mudanças climáticas. Assim, reforça-se a relevância dos solos tropicais em escala global (Freitas *et al.*, 2018).

Mudanças no uso e no manejo da terra, como a substituição da vegetação nativa por agricultura convencional ou pastagens degradadas, promovem perdas expressivas de carbono. Essas alterações comprometem a estrutura, a fertilidade e a sustentabilidade do solo, reduzindo sua resiliência ambiental. Além disso, afetam negativamente os serviços ecossistêmicos associados ao solo. A identificação desses impactos é essencial para orientar ações de recuperação e conservação ambiental (Costa *et al.*, 2020).

A caracterização detalhada do teor e do estoque de carbono ao longo da topossequência contribui significativamente para o entendimento da gênese dos solos e da influência do relevo nos processos pedogenéticos. Essa análise integrada permite identificar padrões consistentes de acúmulo orgânico ao longo da paisagem. Com base nessas informações, torna-se possível subsidiar práticas de manejo mais ajustadas a cada ambiente. Assim, promove-se maior eficiência agrônoma e ambiental (Martins *et al.*, 2025).

Dessa forma, a compreensão da dinâmica do carbono em topossequências evidencia sua relevância como elemento estruturante do solo, indicador ambiental e componente essencial da sustentabilidade agrícola. A interação entre relevo, vegetação, hidrologia e manejo resulta em variações expressivas no teor e no estoque de carbono. Torna-se, portanto, indispensável o monitoramento contínuo e a adoção de práticas conservacionistas. Essas ações são fundamentais para a preservação dos recursos naturais e para a manutenção da produtividade em longo prazo (Cogo *et al.*, 2022).

3 MATERIAL E MÉTODOS

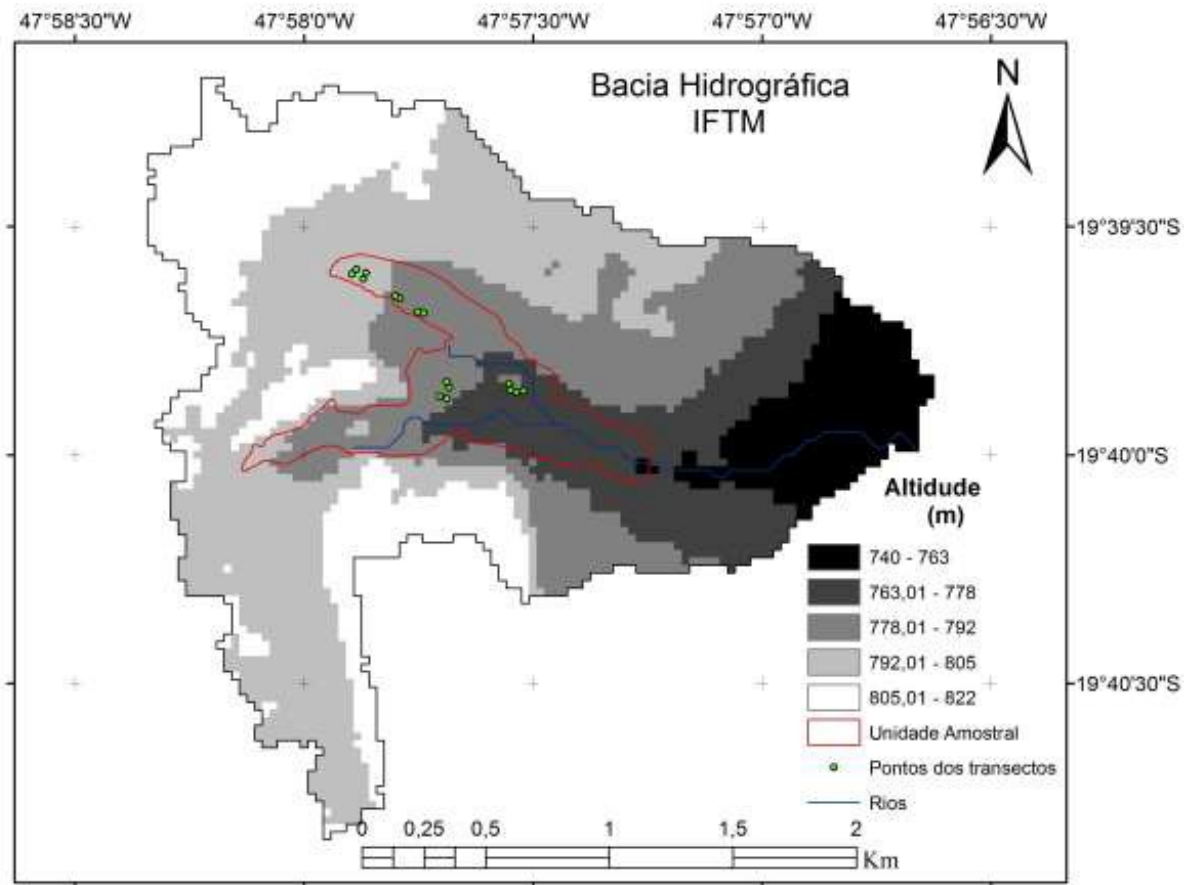
3.1 Caracterização da área experimental

3.1.1 Localização da área

O estudo foi conduzido em uma área experimental localizada no município de Uberaba, MG, representativa da região do Triângulo Mineiro, localizada entre as coordenadas

19°39'10,50" e 19°40'50,55" de latitude Sul e 47°58'20,44" e 47°56'37,23" de longitude Oeste, com altitudes variando entre 740 e 822 m (Figura 1), no período entre julho e dezembro de 2025.

Figura 1 – Localização da unidade amostral na área de estudos localizada no município de Uberaba, MG



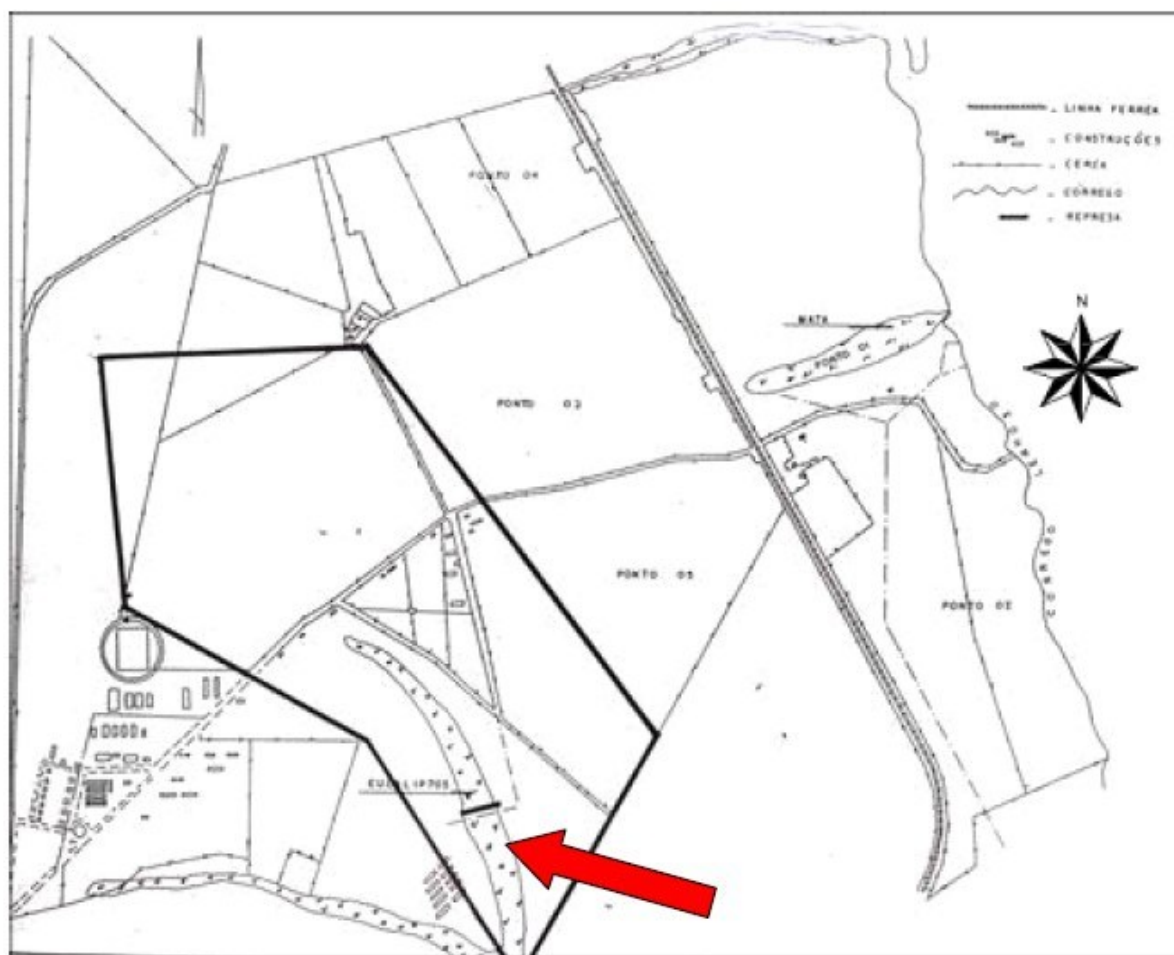
Fonte: Santos (2017).

O município de Uberaba faz parte da grande unidade de relevo do planalto arenítico-basáltico da Bacia do Paraná, onde os solos possuem características de arenosos residuais da Formação Uberaba e Marília, e argilosos residuais da Formação Serra Geral, com topografias caracterizadas por superfícies planas ou ligeiramente onduladas (Abdala; Nishiyama; Torres, 2011).

O uso e ocupação do solo da área ocorreu de várias formas ao longo dos últimos trinta anos, inicialmente como área de pasto natural durante anos consecutivos, depois parte desta área passou a ser utilizada para produção de grãos (milho e soja), cana-de-açúcar e hortaliças, parte para silvicultura com plantio de eucalipto e seringueira, até o final do ano de 2001, quando

foi aprovado um projeto de manejo integrado de microbacias hidrográficas em área delimitada de 136 hectares (Figura 2).

Figura 2 – Área total de 472 hectares do Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) Campus Uberaba, com destaque em vermelho para a microbacia de 136 hectares onde o estudo foi realizado.



Fonte: Torres e Fabian (2006).

Nesta área de 136 hectares delimitada, (Torres e Fabian, 2006) fizeram o levantamento das espécies arbóreas, arbustivas e da vegetação, para determinar o uso atual da área, confirmando que a maior parte ainda estava sendo utilizada como pastagem (30,69%) (Tabela 2).

Tabela 1 – Uso atual dos 136 hectares da área em estudo no IFTM campus Uberaba, em março/2002.

Uso atual dos 136 hectares da área em estudo no IFTM campus Uberaba, em março/2002.

Uso do solo	Área (ha)	Distribuição (%)
Pastagem	41,74	30,69
Lavouras anuais	31,15	22,91
Área urbanizada	17,01	12,50
Florestamento	12,88	9,47
Mata Ciliar	11,92	8,77
Cerrado nativo	10,01	7,35
Pousio	7,47	5,50
Seringueira	1,89	1,39
Horta	1,28	0,94
Cana-de-açúcar	0,65	0,48
TOTAL	136,00	100,00

Fonte: Torres e Fabian (2006).

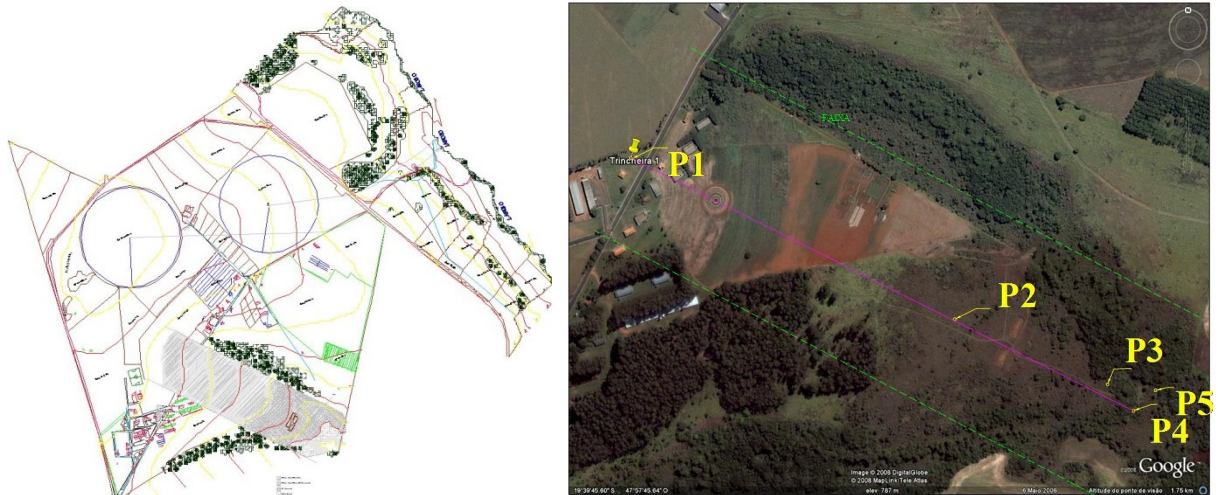
A partir de 2002, uma área de aproximadamente 40 hectares, onde estão localizadas as nascentes, foram cercadas e protegidas contra a entrada de bovinos, equinos e de explorações agrícolas, desde então, o local encontra-se em processo de regeneração natural.

3.1.2 Tipo de solo

A topossequência investigada possui aproximadamente 1.000 metros de extensão, abrangendo desde as posições mais elevadas até as áreas de baixada, permitindo avaliar a influência do relevo na variabilidade dos atributos edáficos. Ao longo da topossequência foram identificadas cinco classes de solo, selecionadas por sua representatividade e heterogeneidade: Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo, Gleissolo Melânico e Gleissolo Háptico. Essas classes diferem em características como profundidade efetiva, textura, teor de matéria orgânica e capacidade de retenção de água e nutrientes, configurando um ambiente adequado para estudos comparativos (Santos, 2017).

A Figura 3 ilustra a organização da topossequência estudada no Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) Campus Uberaba, evidenciando a distribuição espacial dos pontos de amostragem correspondentes às diferentes classes de solo ao longo da vertente. A figura destaca a sequência topográfica desde as posições mais elevadas, ocupadas pelos Latossolos Vermelho (P1) e Vermelho-Amarelo (P2), passando pela posição intermediária representada pelo Cambissolo (P3), até as áreas de menor altitude, onde ocorrem o Gleissolo Háptico (P4) e o Gleissolo Melânico (P5).

Figura 3 – Topossequência destacando os locais onde foram abertas trincheiras e coletadas amostras no Latossolo Vermelho (P1), Latossolo Vermelho-Amarelo (P2), Cambissolo (P3), Gleissolo Háplico (P4) e Gleissolo Melânico (P5) do IFTM Campus Uberaba



Fonte: Resultados originais da pesquisa (2025) *apud* Coutinho *et al.* (2008).

Essa disposição espacial evidencia a influência direta do relevo e do regime hídrico na diferenciação pedológica, fornecendo suporte visual à interpretação dos resultados físicos, químicos e do estoque de carbono. A figura reforça a adequação da abordagem por topossequência para compreender a variabilidade edáfica e os processos pedogenéticos atuantes na paisagem estudada. Em um estudo realizado por Coutinho *et al.* (2010), quando estes solos foram classificados, a análise química e textural na profundidade até 0,20 m foi descrita e está apresentada na Tabela 2.

3.1.3 Clima da região

O clima da região é classificado como *Aw*, tropical, segundo a classificação atualizada de Köppen (Beck *et al.*, 2018), caracterizado por uma estação chuvosa de outubro até março (ou abril) com precipitação anual, variando entre 1300 mm e 1700 mm e estação seca de abril a setembro, com temperaturas médias variando de 18 °C a 28 °C, com baixa amplitude térmica, com umidade relativa média do ar oscilando entre 70% e 75%, com valor máximo de 81% e mínimo de 52% (Inmet, 2025).

Tabela 2 – Análises químicas e texturais do Latossolo Vermelho (P1), Latossolo Vermelho-Amarelo (P2), Cambissolo (P3), Gleissolo Háptico (P4) e Gleissolo Melânico (P5) da argila total dos horizontes superficiais dos perfis estudados.

Horizonte	Atributos químicos e textural								
	pH	Al ³⁺cmolc kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	P mg kg ⁻¹	C	Argilag kg ⁻¹	Silte	Areia
A	P1								
	5,3	0,0	0,1	0,2	0,72	7,12	233	75	692
	P2								
	5,9	0,0	0,1	0,4	2,45	11,71	226	56	718
	P3								
	4,9	0,0	0,2	0,3	2,74	10,12	182	87	731
	P4								
	5,0	0,3	0,3	0,2	11,38	19,65	237	90	673
	P5								
	5,4	0,0	0,4	0,5	381,50	38,82	240	322	438

Fonte: Coutinho *et al.* (2010).

3.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental adotado foi o de blocos ao acaso em com parcelas subdivididas, onde o tratamento principal foram as cinco classes de solo identificadas na área: Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo, Gleissolo Melânico e Gleissolo Háptico e; Tratamentos secundários: Duas profundidades de coleta de solo: 0,0–0,10 m e 0,10–0,20 m, todos com cinco repetições, totalizando 50 unidades experimentais.

A distribuição sistemática dos pontos de coleta ao longo da topossequência foi definida de forma a representar adequadamente a variabilidade espacial, minimizando a influência de fatores externos. Em cada ponto amostral foram coletadas cinco amostras simples para formar uma amostra composta mais representativa.

3.3 Atributos físicos avaliados

3.3.1 Densidade e porosidade do solo

Foram coletadas amostras indeformadas com auxílio de um anel volumétrico de aço, com 48 mm de diâmetro por 53 mm de altura, utilizando o trado de Uhland, nas camadas de 0,00 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m para determinação da densidade e porosidade do solo (Figura 4).

Figura 4 – O anel volumétrico de aço foi cravado no solo de 0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m de profundidade com o trado de Uhland, para coleta de amostra de solo indeformada, em Uberaba, MG, 2024.



Fonte: Martins (2024).

Estas amostras foram identificadas, acondicionadas em papel alumínio, levadas ao laboratório de análises físicas do IFTM, colocadas em geladeira, para serem posteriormente analisadas. À medida que estas amostras foram sendo retiradas da geladeira, este papel alumínio era descartado e as amostras eram pesadas, a seguir, na parte de baixo do anel volumétrico era colocado um pano (Perfex ou Voal) e uma liga de elástico, para este solo não sair do anel, quando este fosse colocado para saturar por 24 horas (Figura 5).

Figura 5 – Anéis volumétricos sendo saturados por 24 horas, depois serem colocados em mesa de tensão a 0,60 m de altura de coluna de água, no Laboratório de Física do Solo do IFTM Campus Uberaba, MG.



Fonte: Martins (2024).

Após as 24 horas, as amostras eram pesadas novamente e colocadas na mesa de sucção a 0,60 m de altura de coluna de água para retirada da água dos macroporos (Figura 5) para determinação da macroporosidade (M_a), a seguir pesadas novamente e depois levadas para secar a 105°C por 24 horas, onde por diferença de massa foi definida a quantidade de água retida nos microporos, determinando-se a microporosidade, sendo que a porosidade total será equivalente à diferença de peso entre anéis saturados e secos, dividido pelo volume da amostra (Teixeira *et al.*, 2017).

A partir dos dados gerados de porosidade do solo foi determinada a relação M_a/PT , conforme sugerido por Taylor e Aschcroft (1972), que expressa a faixa limite de macroporos que deve ter o solo, que deve ser igual ou superior a 33%, para não causar restrições para o desenvolvimento radicular e produtividade das plantas.

3.3.2 Agregação do solo

Foram coletadas amostras deformadas em cinco diferentes pontos nas profundidades com a cavadeira manual de 0-0,10; 0,10-0,20 m em cada tipo de solo, para avaliação da qualidade e estabilidade dos agregados, através do método descrito por Kemper e Chepil (1965), denominado padrão, que consiste em pesar amostras de 50 g de solo, secas ao ar, em duplicata constituída de agregados de diâmetro entre 9,51 a 4,76 mm, os quais serão umedecidos. A seguir as amostras foram transferidas para um jogo de peneiras de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 e 0,106 mm de malha, agitando-se em água, com oscilação vertical por 15 minutos (Figura 6).

Figura 6 – Aparelho de Yooder de oscilação vertical para determinação de estabilidade de agregados, em peneiras com malha de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 e 0,106 mm



Fonte: Martins (2024).

Após a agitação, os conteúdos de cada peneira foram transferidos para recipientes metálicos previamente pesados e submetidos à secagem por 24 horas em estufa a 105 °C, descontado o teor de água em cada peneira. A partir dos valores de massa dos agregados, foi calculado o diâmetro médio ponderado (DMP) (Equação 1), o diâmetro médio geométrico (DMG) (Equação 2) e o índice de estabilidade de agregados (IEA) (Equação 3).

$$DMP = \sum(x_i \times w_i) \quad (1)$$

Em que x_i é o diâmetro médio das classes (mm); e w_i , a proporção de cada classe em relação ao total (Wendling *et al.*, 2005).

$$DMG = e^{\frac{\sum[\ln(x_i) \times \pi]}{\sum \pi}} \quad (2)$$

Em que $\ln[x_i]$ é o logaritmo natural do diâmetro médio das classes; e PI, o peso (g) retido em cada peneira (Demarchi; Perusi; Piroli, 2011).

$$IEA = \left\{ \frac{P.A. - wp < 0,25}{P.A.} \right\} \times 100 \quad (3)$$

O IEA representa uma medida da agregação total do solo e não considera a distribuição por classe de agregados; logo, quanto maior a quantidade de agregado, < 0,25 mm, menor será o IEA.

3.4 Atributos Químicos

3.4.1 Coleta e preparo das amostras de solo

Em cada área, foram abertas 10 mini-trincheiras de 0,50 x 0,50 m de superfície e 0,5 m de profundidade, onde foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0 - 0,10; 0,10 - 0,20 m, posteriormente homogeneizadas de forma que foram obtidas cinco repetições de cada profundidade nas diferentes áreas, para análise dos teores de nutrientes.

As amostras homogeneizadas foram secas ao ar e posteriormente enviadas para serem submetida à análise química, quantificando-se os teores de: fósforo e potássio determinados a partir de digestão nítrico-perclórica. O cálcio e magnésio foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica (Teixeira *et al.*, 2017), o carbono orgânico (C) por Walkley e Black modificado e o S por turbidimetria (Tedesco *et al.*, 1985).

Também foram quantificados teores de: manganês (Mn), zinco (Zn) cobre (Cu) e ferro (Fe) por espectrometria de absorção atômica (Teixeira *et al.*, 2017), boro (B) por extração em água quente (Raij *et al.*, 2001).

3.4.2 Carbono orgânico total e estoque de carbono

Nas trincheiras foram coletas quatro amostras de solo em todas as parcelas nas mesmas profundidades (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m), para a determinação do teor de carbono orgânico total (COT), que foi quantificado segundo Yeomans e Bremner (1988), onde foram pesadas 0,5 g das amostras de terra fina seca ao ar (TFSA), macerada em porcelana e passada pela peneira de 60 mesh.

O material foi colocado em erlenmeyer de 250 mL, sendo em seguida, adicionados 5 mL de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$ 0,167 mol L⁻¹) e 7,5 mL de ácido sulfúrico (H₂SO₄). Posteriormente, foi aquecido em bloco digestor a 170 °C por 30 min, adicionado 80 mL de água destilada e 0,3 mL da solução indicadora (fenantrolina), para depois então titular com a solução de sulfato ferroso amoniacal 0,2 mol L⁻¹.

Para o cálculo do estoque de carbono (EstC) foi utilizado o método proposto por Fernandes e Fernandes (2013), que foi determinado a partir da equação 5.

$$EstC (Mg\ ha^{-1}) = \left[\frac{(C \times Ds \times e)}{10} \right] \quad (4)$$

Em que C é o valor do teor de carbono orgânico total (COT) na camada ($g\ kg^{-1}$); Ds = densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$); e = espessura da camada em análise (cm).

3.5 Análise estatística

Os dados foram inicialmente a verificação dos pressupostos de normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (teste de Bartlett). Quando atendidos, aplicou-se o teste F para significância e, quando significativo, as médias das plantas de cobertura foram comparadas pelo teste de agrupamento de médias Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade do solo (Ds), a distribuição de poros (macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi)), a porosidade total (PT) e a relação Ma/PT foram significativamente influenciadas pelos tipos de solo e pelas profundidades avaliadas em Uberaba, evidenciando a forte dependência desses atributos em relação às características intrínsecas dos solos do Cerrado e ao histórico de uso e manejo (Tabela 3).

Tabela 3 – Valores de densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (PT) e relação entre Ma/PT, em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025.

Tratamento	Atributos físicos do solo				
	Ds	Ma	Mi	PT	Ma/PT
	kg dm ⁻³	dm ³	dm ³	dm ⁻³	
Tipo de solo (TS)					
LV	1,41 a	18,31 c	31,58 b	49,89 b	0,36 b
LVA	1,25 b	26,24 a	26,75 c	52,99 b	0,49 a
CA	1,38 a	19,62 c	28,28 c	45,02 c	0,37 b
GH	1,34 a	23,35 b	25,03 d	47,17 c	0,49 a
GM	0,89 c	18,51 c	41,76 a	61,21 a	0,29 c
Profundidade (P)					
0,00 – 0,10	1,19 b	24,67 a	28,68 b	52,71 a	0,45 a
0,10 – 0,20	1,32 a	17,74 b	32,68 a	49,80 b	0,35 b
Teste F TS	51,16**	23,56**	117,03**	30,00**	16,56**
Teste F P	27,22**	143,02**	91,41**	19,62**	59,09**
Teste F P x TS	2,56 ^{ns}	6,69**	18,70**	6,94**	5,68**
CV (%) P	7,49	10,65	6,33	7,11	17,01
CV (%) TS	6,73	9,67	4,83	4,52	10,81

**Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam os tipos de solo e as profundidades entre sistemas de manejo, que não diferem entre si pelo teste de Scott & Knott ($p < 0,05$). CV% = Coeficiente de variação. LV= Latossolo Vermelho-Amarelo

A relação entre densidade do solo e armazenamento de carbono observada neste estudo reforça que solos com menor densidade aparente tendem a apresentar maior acúmulo de matéria orgânica, devido ao aumento da porosidade e à proteção física do carbono no interior dos

agregados. Esse comportamento foi evidenciado principalmente no Gleissolo Melânico, que apresentou menor densidade e maiores valores de microporosidade e porosidade total, favorecendo a retenção de carbono. Resultados semelhantes foram observados por Florence *et al.* (2021), que destacaram que sistemas com maior acúmulo de matéria orgânica apresentam melhoria na estrutura física e maior capacidade de armazenamento de carbono, especialmente em ambientes com menor perturbação antrópica.

A Ds variou de 0,89 a 1,41 kg dm⁻³ que comprova que não existe qualquer tipo de restrição ao desenvolvimento radicular das plantas nestas áreas, mesmo ela tendo sido utilizada durante muito tempo como pastagem, considerando que o valor crítico de Ds estabelecido para o desenvolvimento radicular é de 1,55 kg dm⁻³ para solos com teor de argila variando entre 200 e 550 g kg⁻¹ (Reinert *et al.*, 2008) e para solos arenosos de 1,65 kg dm⁻³ proposto por Araújo, Tormena e Silva (2004).

Entre os tipos de solo, o Gleissolo Melânico (GM) apresentou menor Ds, associada a maiores valores de Mi e PT, indicando melhor organização estrutural. Em solos do Cerrado, essa condição está frequentemente relacionada a maiores teores de matéria orgânica e maior estabilidade de agregados, fatores essenciais para a qualidade física do solo (Cherubin *et al.*, 2016). Além disso, estudos conduzidos em Latossolos do Cerrado mostram que sistemas com maior aporte de resíduos orgânicos promovem aumento da Mi e melhoria da retenção de água, sem necessariamente comprometer a estrutura (Marchão *et al.*, 2007).

Por outro lado, os maiores valores de Ds observados nos solos Latossolo vermelho (LV) e no Cambissolo (CA) indicam possível maior grau de compactação ou menor desenvolvimento estrutural, o que pode restringir o crescimento radicular e a infiltração de água. Em condições de Cerrado, o aumento da Ds após a conversão de áreas nativas para uso agrícola é amplamente documentado, sendo frequentemente acompanhado pela redução da macroporosidade (Ngolo *et al.*, 2019).

Segundo Brady e Weil (2013), a Ds tende a aumentar à medida que aumenta a profundidade do perfil, sendo que isto se deve, provavelmente, ao menor teor de matéria orgânica, menor agregação, menos raízes e a um adensamento causado pela massa das camadas superiores, condição esta que ocorre naturalmente nestes tipos de solos, com exceção do GH.

Cogo *et al.* (2022) relatam que, em ambientes com características semelhantes, observa-se um aumento da Ds com o avanço da profundidade, fenômeno associado principalmente à menor incorporação de resíduos orgânicos nas camadas subsuperficiais. Esse comportamento confirma o padrão identificado, evidenciando que a redução do aporte de matéria orgânica compromete a estrutura e a porosidade do solo ao longo do perfil.

A variação da D_s entre os tipos de solo observada na tabela reflete diretamente fatores pedogenéticos, como teor de argila, estrutura, matéria orgânica e grau de compactação ao longo da topossequência. Solos hidromórficos, como os Gleissolos, tendem a apresentar menores densidades devido ao acúmulo de matéria orgânica e à baixa aeração, enquanto Latossolos e Cambissolos, mais evoluídos e com estrutura granular mais consolidada, apresentam valores mais altos, sobretudo em maiores profundidades, onde a atividade biológica é reduzida (Almeida *et al.*, 2024).

A Ma foi mais elevada no LVA, refletindo melhores condições de aeração e drenagem. Esse resultado indica maior equilíbrio estrutural, condição considerada ideal para o desenvolvimento das culturas. Em sistemas agrícolas do Cerrado, a manutenção de níveis adequados de Ma é fundamental para garantir trocas gasosas e evitar limitações ao crescimento radicular, sendo fortemente influenciada pelo sistema de manejo adotado (Santos *et al.*, 2011).

Em relação à profundidade, o aumento da densidade do solo na camada de 0,10–0,20 m, associado à redução da Ma e aumento da Mi , reflete um padrão típico de solos sob uso agrícola no Cerrado. Esse comportamento está relacionado à menor incorporação de matéria orgânica e ao efeito do tráfego de máquinas, que promove compactação subsuperficial. Estudos conduzidos na região demonstram que a compactação em subsuperfície é um dos principais fatores limitantes à qualidade física do solo em sistemas agrícolas intensivos (Schossler *et al.*, 2018).

A maior PT e relação Ma/PT na camada superficial indicam melhores condições estruturais, associadas ao maior acúmulo de matéria orgânica e à maior atividade biológica nessa camada. Em solos do Cerrado, a biota do solo e o sistema radicular das plantas desempenham papel fundamental na formação e estabilização de agregados, contribuindo para o aumento da porosidade e melhoria da qualidade física (Six *et al.*, 2004). Além disso, práticas conservacionistas, como sistemas integrados e plantio direto, têm sido amplamente associadas à melhoria dos atributos físicos do solo no Cerrado, promovendo aumento da Ma e redução da densidade do solo ao longo do tempo (Bonetti *et al.*, 2018).

A interação significativa entre tipo de solo e profundidade para a maioria dos atributos indica que a distribuição dos poros no perfil do solo varia conforme as características específicas de cada solo, incluindo textura, mineralogia e histórico de manejo. Essa variabilidade é típica dos solos do Cerrado, que apresentam elevada heterogeneidade estrutural e forte sensibilidade às práticas de manejo (Silva *et al.*, 2024).

De forma geral, os resultados demonstram que solos com menor D_s e melhor distribuição de poros apresentam condições físicas mais favoráveis ao desenvolvimento das

plantas. Por outro lado, solos com maior Ds e menor Ma requerem adoção de práticas de manejo conservacionistas, como rotação de culturas, uso de plantas de cobertura e redução do tráfego de máquinas, estratégias amplamente recomendadas para a sustentabilidade dos sistemas produtivos no Cerrado.

O desdobramento da interação entre tipo de solo e profundidade para os atributos físicos evidencia que a distribuição, conectividade e funcionalidade dos poros variam significativamente ao longo do perfil dos solos avaliados em Uberaba. Esses resultados refletem a influência conjunta das características intrínsecas dos solos do Cerrado e dos efeitos do manejo agrícola sobre a qualidade física (Tabela 4).

Tabela 4 – Desdobramentos das interações significativas da macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (PT) e relação entre Ma/PT, em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025.

Profundidade m	Atributos físicos do solo			
	Ma	Mi	PT	Ma/PT
	 dm ⁻³ dm ⁻³			
LV				
0,00-0,10	22,10 cA	30,42 bA	52,53 bA	0,42 bA
0,10-0,20	14,51 bB	32,72 bA	47,24 bB	0,31 bB
LVA				
0,00-0,10	31,65 aA	24,38 cB	56,03 aA	0,56 aA
0,10-0,20	20,81 aB	29,12 cA	49,94 bB	0,41 aB
CA				
0,00-0,10	21,05 cA	28,32 bA	46,19 cA	0,37 bA
0,10-0,20	18,19 aB	28,24 cA	43,84 cA	0,37 aA
GH				
0,00-0,10	27,95 bA	23,79 cB	49,31 cA	0,57 aA
0,10-0,20	18,75 aB	26,27 dA	45,02 cB	0,41 aB
GM				
0,00-0,10	20,60 cA	36,46 aB	20,60 cA	0,32 cA
0,10-0,20	16,42 bB	47,05 aA	16,42 bB	0,26 bB
CV (%)	10,01	6,91	5,87	12,01

******Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam as profundidades na mesma área e maiúsculas nas colunas comparam as mesmas profundidades entre sistemas de manejo, que não diferem entre si pelo teste de Scott & Knott ($p < 0,05$). CV% = Coeficiente de variação; PROF = Profundidade.

De maneira geral, observou-se redução significativa da Ma com o aumento da profundidade em todos os solos, acompanhada, em vários casos, pelo aumento da Mi. Esse comportamento indica uma reorganização estrutural do solo, com diminuição dos poros responsáveis pela aeração e aumento daqueles associados à retenção de água. Esse padrão é amplamente relatado em solos tropicais sob uso agrícola e está associado à compactação subsuperficial e à menor influência da matéria orgânica em profundidade (Bünemann *et al.*, 2018; Reichert *et al.*, 2009).

No solo LV, a redução da Ma em profundidade, sem alteração significativa da Mi, evidencia que a degradação estrutural ocorre principalmente pela perda de poros maiores. Esse comportamento resulta em menor porosidade total e redução da relação Ma/PT, indicando limitação à aeração do solo. Em Latossolos do Cerrado, esse padrão tem sido associado ao efeito do tráfego de máquinas e à ausência de práticas que promovam a reestruturação do solo (Tormena *et al.*, 2016).

Nenhum dos valores observados para Ma e Mi ficou abaixo do valor limite de 10 dm^{-3} dm^{-3} (ou 10%), estabelecido por Kiehl (1979), que representa o limite crítico considerado impeditivo para o crescimento de raízes para culturas anuais, sendo que o autor acrescenta ainda que o solo ideal é aquele que contém 1/3 de Ma ($34 \text{ dm}^{-3} \text{ dm}^{-3}$ ou 34%) e 2/3 de Mi ($66 \text{ dm}^{-3} \text{ dm}^{-3}$ ou 66%), valores estes um pouco acima daqueles que foram obtidos neste estudo.

De acordo com Michelin *et al.* (2007), este valor mínimo de $10 \text{ dm}^{-3} \text{ dm}^{-3}$ (ou 10%) é apropriado para as trocas líquidas e gasosas entre o ambiente externo e o solo, sendo crítico para o desenvolvimento de raízes da maioria das culturas.

Para o LVA, observou-se comportamento mais pronunciado, com redução significativa da Ma e aumento da Mi em profundidade, acompanhado por diminuição da PT e da relação Ma/PT. Esse resultado evidencia perda do equilíbrio entre os poros de aeração e retenção, condição essencial para o funcionamento adequado do sistema solo-planta. De acordo com Dexter (2004), a proporção entre macro e microporos é um dos principais indicadores da qualidade física do solo, influenciando diretamente o crescimento radicular. Em sistemas do Cerrado, esse tipo de alteração tem sido frequentemente associado à intensificação do uso agrícola (Marchão *et al.*, 2007).

No solo CA, embora tenha ocorrido redução da Ma com a profundidade, a Mi e a PT permaneceram estáveis, resultando em manutenção da relação Ma/PT. Esse comportamento sugere maior estabilidade estrutural ao longo do perfil, possivelmente associada a características texturais ou mineralógicas específicas. No entanto, os valores relativamente baixos de Ma indicam limitações à difusão de oxigênio no solo, o que pode afetar processos fisiológicos das plantas, como respiração radicular (Horn; Way, 2004).

Os valores de Ma e Mi evidenciam diferenças estruturais marcantes entre os solos ao longo da topossequência, especialmente pela maior Ma nos solos bem drenados e maior Mi nos solos hidromórficos. A PT reduzida em solos com maior Ds indica maior compactação, condição comum em ambientes mais argilosos ou sob influência de hidromorfia (Fontana *et al.* 2021).

O solo GH apresentou elevada Ma e relação Ma/PT na camada superficial, indicando excelente condição de aeração. Contudo, houve redução significativa desses atributos em profundidade, acompanhada por aumento da Mi, o que evidencia heterogeneidade estrutural no perfil. Esse padrão é típico de solos do Cerrado, nos quais a camada superficial é mais influenciada pela matéria orgânica e pela atividade biológica, enquanto a subsuperfície tende a apresentar maior densificação (Six *et al.*, 2004; Cherubin *et al.*, 2016).

No solo GM, verificou-se predominância de Mi em ambas as profundidades, especialmente na camada subsuperficial, associada a baixos valores de Ma e relação Ma/PT. Esse comportamento indica maior capacidade de retenção de água, porém com possíveis limitações à aeração. Solos com elevada Mi tendem a apresentar menor difusão de oxigênio, o que pode restringir o crescimento radicular e a atividade microbiana aeróbia (Batey, 2009). Esse padrão é frequentemente observado em solos com características hidromórficas ou maior teor de argila dispersa, comuns em algumas condições do Cerrado.

Na comparação entre solos dentro da mesma profundidade, observa-se que, na camada superficial, LVA e GH apresentaram os maiores valores de Ma e relação Ma/PT, indicando melhores condições físicas para o desenvolvimento das plantas. Esses resultados estão alinhados com estudos que demonstram que solos com maior proporção de macroporos favorecem a infiltração de água, aeração e crescimento radicular (Reichert *et al.*, 2009; Dexter, 2004). Por outro lado, LV, CA e GM apresentaram menores valores desses atributos, sugerindo maior limitação física.

Na camada de 0,10–0,20 m, verificou-se redução generalizada da Ma e da relação Ma/PT, com aumento da Mi em alguns solos, especialmente no GM. Esse comportamento confirma que a subsuperfície constitui uma zona mais restritiva ao crescimento radicular, sendo

frequentemente identificada como camada de impedimento físico em sistemas agrícolas do Cerrado (Schossler *et al.*, 2018; Bonetti *et al.*, 2018).

Avaliando a relação Ma/PT, observou-se que somente na área com LV, na profundidade de 0,10 a 0,20 m é que o valor determinado ficou menor ($0,30 \text{ dm}^{-3} \text{ dm}^{-3}$ ou 30%) que o $0,33 \text{ dm}^{-3} \text{ dm}^{-3}$, que o valor considerado limitante ao desenvolvimento radicular e que reduz a taxa de difusão de gases no solo e dificulta a drenagem do excesso de água das chuvas (Taylor e Aschcroft, 1972; Bertol *et al.*, 2004), que consideram que o valor ideal é de cerca de 1/3 da PT, mesmo assim, ficou bem próximo desse valor.

De forma geral, os resultados demonstram que a qualidade física do solo é superior na camada superficial, especialmente nos solos LVA e GH, enquanto a subsuperfície apresenta sinais consistentes de degradação estrutural. Esse padrão reforça a necessidade da adoção de práticas de manejo conservacionistas, como plantio direto, rotação de culturas e uso de plantas de cobertura, que contribuem para a melhoria da estrutura do solo e aumento da Ma ao longo do perfil (Cherubin *et al.*, 2016; Bünemann *et al.*, 2018).

A distribuição dos agregados por classes de diâmetro foi significativamente influenciada pelos tipos de solo e pelas profundidades avaliadas em Uberaba, evidenciando diferenças expressivas na estabilidade estrutural entre os solos do Cerrado (Tabela 5).

Observou-se predominância de agregados na classe de 2,00 mm para os solos LV, LVA, CA e GH, os quais não diferiram entre si, indicando elevada estabilidade estrutural. A formação e manutenção desses macroagregados estão diretamente relacionadas à ação de agentes cimentantes temporários e persistentes, como raízes, exsudatos orgânicos e óxidos de ferro e alumínio, característicos de solos altamente intemperizados (Tisdall; Oades, 1982; Oades, 1984). Esses resultados corroboram estudos em solos do Cerrado, nos quais a presença de macroagregados está associada à maior resistência à erosão e melhor funcionamento físico do solo (Salton *et al.*, 2014).

Em contraste, o solo GM apresentou menor proporção de agregados na classe de 2,00 mm e maior concentração na fração $<0,106 \text{ mm}$, indicando menor estabilidade estrutural e maior suscetibilidade à desagregação. Esse comportamento sugere predominância de forças de coesão fracas entre partículas, o que pode comprometer a infiltração de água e aumentar o risco de selamento superficial. Segundo Bronick e Lal (2005), solos com maior proporção de microagregados tendem a apresentar menor resistência estrutural e maior vulnerabilidade à degradação física.

Nas classes intermediárias (1,00; 0,50; 0,250 e 0,106 mm), o LVA e o GH apresentaram maiores valores em relação aos demais solos, indicando maior heterogeneidade estrutural e

melhor distribuição do tamanho dos agregados. Essa condição é considerada favorável, pois reflete um sistema poroso mais equilibrado, com implicações positivas para a infiltração de água e a difusão de gases (Dexter, 2004). Em sistemas agrícolas do Cerrado, a diversidade de classes de agregados tem sido associada à adoção de práticas conservacionistas, como plantio direto e integração lavoura-pecuária (Loss *et al.*, 2015).

Tabela 5 – Distribuição dos agregados por classes do diâmetro, no Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Cambissolo (CA), Gleissolo Háptico (GH) e Melânico (GM), em Uberaba, MG, 2025.

Tratamento	Classes de agregados por peneira					
	2,00	1,00	0,50	0,250	0,106	<0,106
	%					
Tipo de solo (TS)						
LV	46,49 a	0,60 b	0,55 b	0,73 b	0,59 c	0,75 d
LVA	44,79 a	0,67 a	0,82 a	1,27 a	0,81 b	1,26 c
CA	46,06 a	0,50 d	0,50 b	0,77 b	0,78 b	1,14 c
GH	43,90 a	0,56 c	0,60 b	1,42 a	1,13 a	2,11 b
GM	40,17b	0,14 e	0,10 c	0,14 c	0,24 d	8,88 a
Profundidade (P)						
0,00 – 0,10	44,93 a	0,39 b	0,36 b	0,73 b	0,67 b	2,64 b
0,10 – 0,20	43,63 b	0,59 a	0,66 a	1,01 a	0,76 a	3,02 a
Teste F TS	6,53 **	204,47**	113,33**	77,45**	330,44**	2128,20**
Teste F P	10,59**	127,56**	214,44**	47,13**	27,26**	14,31 **
Teste F P x TS	3,59**	44,07**	41,05**	40,88**	100,80**	1,43 ^{ns}
CV (%) P	7,04	9,33	15,00	20,94	7,96	8,28
CV (%) TS	3,21	12,69	14,24	16,78	8,31	12,37

**Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam os tipos de solo e as profundidades entre sistemas de manejo, que não diferem entre si pelo teste de Scott & Knott ($p < 0,05$). CV (%) = Coeficiente de variação.

A distribuição dos agregados ao longo da topossequência evidencia a forte influência do ambiente pedológico na organização estrutural dos solos, especialmente em função da dinâmica hídrica. Solos hidromórficos, como os Gleissolos, apresentam maior proporção de agregados finos devido à saturação hídrica frequente, que limita a formação de ligações estáveis

entre as partículas. Fushimi *et al.* (2020) destacam que esses ambientes apresentam menor estabilidade estrutural em função dos processos redutores que afetam a cimentação dos agregados, reduzindo sua resistência à desagregação. Dessa forma, os resultados obtidos reforçam a importância do regime hídrico na definição da qualidade estrutural dos solos tropicais.

A análise estatística, por meio dos testes F, evidenciou diferenças significativas entre os tipos de solo, profundidades e suas interações (TS × Prof) na maioria das classes de agregados, indicando que a estrutura do solo é fortemente influenciada por fatores pedogenéticos e ambientais. Os Gleissolos apresentaram comportamento distinto em relação aos demais solos, reforçando a influência da hidromorfia na formação e estabilidade dos agregados.

Em contraste, os Latossolos demonstraram elevada homogeneidade estrutural, característica associada à sua mineralogia rica em óxidos. A organização estrutural dos agregados exerce papel determinante na infiltração de água, na resistência ao impacto das gotas de chuva e na suscetibilidade à erosão, tornando essa análise essencial para a compreensão dos processos físicos atuantes nos solos da área estudada.

A predominância de agregados de maior diâmetro nos solos mais desenvolvidos, como Latossolos e Cambissolos, indica elevada estabilidade estrutural, resultante da interação entre óxidos de ferro, matéria orgânica e atividade biológica. Em contrapartida, os Gleissolos apresentaram maior proporção de agregados finos, devido à saturação hídrica frequente, que reduz a coesão entre partículas e favorece a desagregação. Estudos como o de Fushimi *et al.* (2020) destacam que ambientes hidromórficos apresentam menor estabilidade estrutural em função dos processos redutores que comprometem a cimentação dos agregados. Dessa forma, os resultados evidenciam que o regime hídrico e o estágio de evolução pedogenética são fatores determinantes na formação e reorganização estrutural ao longo da topossequência.

Em relação à profundidade, verificou-se redução da proporção de agregados de maior diâmetro (2,00 mm) na camada subsuperficial, acompanhada por aumento das frações menores, especialmente <0,106 mm. Esse padrão indica menor estabilidade estrutural em profundidade, resultado da redução do teor de matéria orgânica e da menor atividade biológica nessa camada. Estudos em solos tropicais demonstram que a agregação está fortemente associada à presença de carbono orgânico, cuja concentração diminui com a profundidade (Six *et al.*, 2004; Bünemann *et al.*, 2018).

A interação significativa entre tipo de solo e profundidade para a maioria das classes de agregados indica que a estabilidade estrutural responde de forma diferenciada conforme o solo e o ambiente edáfico. Essa variabilidade é típica dos solos do Cerrado, que apresentam elevada

diversidade mineralógica e estrutural, exigindo abordagens específicas de manejo (Assis *et al.*, 2018).

De forma geral, os resultados indicam que LV, LVA, CA e GH apresentam melhor qualidade estrutural, enquanto o GM apresenta maior fragilidade. Esse comportamento reforça a necessidade de práticas de manejo que promovam a agregação do solo, como o aumento do aporte de matéria orgânica e a redução da mobilização mecânica, estratégias amplamente recomendadas para sistemas tropicais (Salton *et al.*, 2014).

O desdobramento da interação entre tipo de solo e profundidade para a distribuição dos agregados evidencia que a estabilidade estrutural e a dinâmica de agregação variam significativamente ao longo do perfil dos solos avaliados em Uberaba, refletindo a influência conjunta de fatores pedogenéticos e do manejo (Tabela 6).

Tabela 6 – Desdobramento das interações significativas da distribuição dos agregados por classes do diâmetro, no Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Cambissolo (CA), Gleissolo Háptico (GH) e Melânico (GM), em Uberaba, MG, 2025.

Profundidade	Classes de agregados por peneira				
	2,00	1,00	0,50	0,250	0,106
m	%				
LV					
0,00–0,10	47,06 aA	0,44 bB	0,43 bA	0,58 bB	0,53 bC
0,10–0,20	45,93 aA	0,77 aB	0,67 aC	0,88 a	0,66 a
LVA					
0,00–0,10	46,93 aA	0,37 bC	0,42 bA	0,63 bB	0,47 bC
0,10–0,20	42,65 bB	0,97 aA	1,21 aA	1,91 a	1,16 a
CA					
0,00–0,10	46,20 aA	0,44 bB	0,42 bA	0,80 aB	0,83 aB
0,10–0,20	45,92 aA	0,54 aC	0,58 aC	0,74 a	0,73 b
GH					
0,00–0,10	44,16 aA	0,57 aA	0,44 bA	1,51 aA	1,29 aA
0,10–0,20	43,63 aA	0,54 aC	0,76 aB	1,33 a	0,97 b
GM					
0,00–0,10	40,32 aB	0,12 aD	0,10 aB	0,11 aC	0,23 aD
0,10–0,20	40,02 aB	0,15 aD	0,11 aD	0,18 a	0,26 a

CV (%)	5,18	10,25	14,01	17,82	11,01
--------	------	-------	-------	-------	-------

**Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam as profundidades na mesma área e maiúsculas nas colunas comparam as mesmas profundidades entre sistemas de manejo, que não diferem entre si pelo teste de Scott & Knott ($p < 0,05$). CV% = Coeficiente de variação; PROF = Profundidade. Fonte: Resultados Originais da pesquisa (2025).

A maior estabilidade estrutural observada nos solos bem drenados pode ser explicada pela interação entre matéria orgânica e frações minerais, especialmente aquelas associadas a óxidos de ferro e alumínio. De acordo com Lavalley, Soong e Cotrufo (2020), a matéria orgânica do solo pode ser estabilizada em diferentes frações, sendo a fração associada aos minerais a mais resistente à decomposição. Esse mecanismo contribui para a formação de agregados mais estáveis e para a manutenção da estrutura do solo ao longo do tempo, especialmente em ambientes altamente intemperizados, como os Latossolos.

Após a determinação da distribuição dos agregados por classes de diâmetro, foram calculados os índices estruturais, incluindo o índice de estabilidade de agregados em água (IEA), o diâmetro médio ponderado (DMP), o diâmetro médio geométrico (DMG) e o AGRI. De maneira geral, observou-se que todos os índices apresentaram valores significativamente superiores ($p < 0,05$) na camada superficial (0,00–0,10 m), com redução progressiva em profundidade, conforme evidenciado na Tabela 6. Esse padrão está associado ao maior teor de matéria orgânica e à maior atividade biológica na camada superficial, fatores que favorecem a formação e estabilidade dos agregados.

Os resultados dos testes F indicaram diferenças significativas entre os tipos de solo e profundidades, demonstrando que a estabilidade dos agregados é sensível tanto às condições pedogenéticas quanto à posição no perfil do solo. A interação significativa observada em algumas variáveis reforça que a resposta estrutural varia conforme o ambiente de formação. Os elevados valores do índice AGRI nos solos bem drenados indicam predominância de macroagregados, fundamentais para a manutenção da estrutura e para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Assim, a Tabela 6 apresenta informações essenciais para a interpretação do comportamento físico dos solos avaliados.

Os maiores valores de DMP, DMG e IEA observados nos solos bem drenados confirmam maior estabilidade estrutural, característica típica de solos altamente intemperizados e ricos em óxidos. Por outro lado, os menores valores registrados nos Gleissolos evidenciam instabilidade estrutural, decorrente das condições de saturação hídrica que limitam a agregação. Esses resultados corroboram estudos como os de Rosa e Soares Neto (2020), que destacam a

influência do regime hídrico na estabilidade estrutural. Além disso, pesquisas conduzidas por Martins (2024) em topossequências tropicais apresentam padrões semelhantes, evidenciando maior suscetibilidade à degradação física em solos hidromórficos.

A análise química dos solos ao longo da topossequência evidenciou características típicas de ambientes tropicais altamente intemperizados, confirmando a predominância de solos ácidos, com valores de pH variando entre 3,78 e 4,18 em CaCl_2 . Observou-se que os solos com menores teores de matéria orgânica, como Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo e Gleissolo Háptico, apresentaram baixos níveis de nutrientes, frequentemente abaixo dos níveis de suficiência. Em contraste, o Gleissolo Melânico apresentou maiores teores de matéria orgânica, refletindo maior capacidade de retenção de nutrientes e melhores condições químicas relativas, associadas ao ambiente hidromórfico.

O bioma Cerrado, que ocupa aproximadamente 204 milhões de hectares no Brasil, apresenta ampla utilização agrícola, embora seus solos, especialmente os Latossolos, apresentem limitações químicas naturais, como elevada acidez e baixa fertilidade. Essas características estão associadas ao intenso intemperismo e à lixiviação de bases trocáveis, além da forte sazonalidade climática, com períodos secos que podem se estender de cinco a sete meses. Esses fatores reforçam a necessidade de manejo adequado para garantir a sustentabilidade dos sistemas produtivos nessas regiões (Embrapa, 1982; Vilela *et al.*, 2015).

De maneira geral, a classe de agregados de 2,00 mm apresentou estabilidade relativa entre as profundidades para a maioria dos solos, indicando que os macroagregados são mais resistentes à desagregação. Esse comportamento está associado à atuação de agentes cimentantes persistentes, como óxidos de ferro e alumínio, característicos de solos altamente intemperizados (Oades, 1984).

No entanto, nas classes intermediárias e menores, foram observadas alterações significativas. No LV, houve aumento das frações intermediárias em profundidade, indicando fragmentação parcial dos macroagregados. Esse processo pode estar associado à compactação subsuperficial e à redução da proteção física da matéria orgânica, favorecendo a desagregação (Bronick; Lal, 2005).

O LVA apresentou o comportamento mais evidente de redistribuição estrutural, com redução significativa dos agregados maiores e aumento expressivo das frações menores em profundidade. Esse padrão indica maior suscetibilidade à degradação estrutural na camada subsuperficial, comportamento frequentemente observado em sistemas agrícolas intensivos no Cerrado (Cherubin *et al.*, 2016; Loss *et al.*, 2015).

No solo CA, a distribuição dos agregados apresentou maior estabilidade ao longo do perfil, com pequenas variações nas classes intermediárias. Esse comportamento sugere maior resistência estrutural, possivelmente associada à textura e ao arranjo das partículas do solo. O GH apresentou elevada participação de agregados nas classes intermediárias, especialmente na camada superficial, com leve redistribuição em profundidade. Esse padrão pode estar relacionado à maior umidade e atividade biológica, fatores que favorecem a formação e estabilização de agregados (Six *et al.*, 2004).

O GM, por sua vez, apresentou baixa participação de macroagregados e predominância de frações finas, com pouca variação entre profundidades. Esse comportamento indica baixa dinâmica de agregação e maior fragilidade estrutural, sendo característico de solos com menor capacidade de estabilização da matéria orgânica (Batey, 2009).

Na comparação entre solos dentro de cada profundidade, observa-se que LV, LVA, CA e GH apresentam maior proporção de agregados estáveis, enquanto o GM apresenta maior proporção de frações finas. Essa diferença reforça a influência das características intrínsecas dos solos na estabilidade estrutural e destaca a importância de práticas de manejo diferenciadas.

De forma geral, os resultados demonstram que a estabilidade dos agregados é maior na camada superficial e tende a diminuir em profundidade, especialmente em solos mais sensíveis à degradação. Esse comportamento reforça a importância da adoção de sistemas conservacionistas no Cerrado, como plantio direto e sistemas integrados, que promovem o aumento da matéria orgânica e a melhoria da estrutura do solo ao longo do perfil (Salton *et al.*, 2014; Assis *et al.*, 2018).

Os índices de agregação do solo, representados pelo diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice de estabilidade de agregados (IEA) e porcentagem de agregados > 2 mm (AGRI), foram significativamente influenciados pelos tipos de solo e pelas profundidades avaliadas em Uberaba, evidenciando diferenças na qualidade estrutural entre os solos do Cerrado (Tabela 7).

Tabela 7– Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice de estabilidade de agregados (IEA) e porcentagem de agregados com diâmetro superior a 2 mm (AGRI), em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025.

Tratamento	Atributos físicos do solo			
	DMP	DMG	IEA	AGRI
m	mm.....		%	
Tipo de solo (TS)				
LV	4,68 a	4,18 a	97,31 a	92,99 a
LVA	4,66 a	3,79 a	95,75 a	89,57 a
CA	4,56 a	3,99 a	96,17 a	92,12 a
GH	4,46 a	3,47 a	92,97 a	87,79 a
GM	4,06 b	2,25 b	81,76 b	80,34 b
Profundidade (P)				
0,00 – 0,10	4,55 a	3,68 a	93,33 a	89,87 a
0,10 – 0,20	4,42 b	3,39 b	92,25 b	87,25 b
Teste F TS	7,15**	14,75**	17,75**	6,53**
Teste F P	11,69**	11,02**	5,36*	10,56**
Teste F P x TS	3,20*	3,17*	1,53 ^{ns}	3,59**
CV (%) P	6,70	17,83	5,15	7,04
CV (%) TS	3,10	8,82	1,78	3,21

**Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam os tipos de solo e as profundidades entre sistemas de manejo, que não diferem entre si pelo teste de Scott & Knott ($p < 0,05$). CV (%) = Coeficiente de variação.

A baixa disponibilidade de nutrientes observada nos solos mais intemperizados está diretamente relacionada à sua gênese e evolução pedológica, características típicas dos solos tropicais brasileiros. Segundo Júnior *et al.* (2020), Latossolos apresentam limitações químicas naturais, como baixa saturação por bases e elevada acidez, exigindo manejo adequado para viabilizar sua utilização agrícola. Nesse sentido, a variabilidade observada entre os solos da topossequência evidencia a necessidade de estratégias diferenciadas de manejo, considerando as particularidades de cada ambiente pedológico.

De maneira geral, os solos LV, LVA, CA e GH não diferiram entre si para os atributos avaliados, apresentando elevados valores de DMP e DMG, bem como altos índices de estabilidade de agregados (IEA) e elevada proporção de agregados > 2 mm (AGRI). Esses

resultados indicam boa estabilidade estrutural, associada à maior resistência à desagregação e maior capacidade de manutenção da estrutura do solo frente a agentes externos. Segundo Nimmo (2004), índices como DMP e DMG são indicadores diretos da resistência dos agregados à ruptura, refletindo a integridade estrutural do solo.

Em contraste, o solo GM apresentou valores significativamente inferiores para todos os atributos, com destaque para o DMG e o IEA, indicando menor estabilidade estrutural e maior suscetibilidade à desagregação. Esse comportamento está alinhado com os resultados observados nas Tabelas 5 e 6, nas quais esse solo apresentou maior proporção de frações finas. Solos com baixos valores de DMP e DMG tendem a apresentar menor resistência à ação da água e maior risco de degradação física (Le Bissonnais, 1996).

A elevada estabilidade estrutural observada nos solos LV, LVA, CA e GH pode ser atribuída à presença de agentes cimentantes persistentes, como óxidos de ferro e alumínio, bem como à contribuição da matéria orgânica na formação de agregados estáveis. Em solos tropicais altamente intemperizados, esses fatores desempenham papel fundamental na estabilização da estrutura do solo (Oades, 1984; Six *et al.*, 2004).

Em relação à profundidade, verificou-se redução significativa dos valores de DMP, DMG, IEA e AGRI na camada de 0,10–0,20 m, indicando menor estabilidade estrutural em subsuperfície. Esse comportamento está associado à redução do teor de matéria orgânica e da atividade biológica, além do possível efeito da compactação, fatores que contribuem para a diminuição da agregação do solo. Estudos em ambientes tropicais demonstram que a estabilidade de agregados diminui com a profundidade, acompanhando o gradiente de carbono orgânico no perfil (Six *et al.*, 2004; Bünemann *et al.*, 2018).

A interação significativa entre tipo de solo e profundidade para DMP, DMG e AGRI indica que a resposta da estabilidade estrutural ao longo do perfil varia conforme o solo. Esse comportamento reforça a heterogeneidade dos solos do Cerrado, onde fatores como textura, mineralogia e histórico de manejo influenciam diretamente a dinâmica de agregação (Salton *et al.*, 2014).

De forma geral, os resultados demonstram que a qualidade estrutural do solo é mais elevada na camada superficial e tende a diminuir em profundidade, especialmente em solos mais sensíveis à desagregação, como o GM. A manutenção de elevados valores de DMP, DMG e IEA é fundamental para garantir a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, uma vez que está diretamente relacionada à infiltração de água, resistência à erosão e desenvolvimento radicular (Le Bissonnais, 1996).

Nesse contexto, práticas de manejo conservacionistas, como o aumento do aporte de matéria orgânica, a redução do revolvimento do solo e a adoção de sistemas integrados, são essenciais para promover a estabilidade dos agregados e melhorar a qualidade física dos solos do Cerrado. O desdobramento da interação entre tipo de solo e profundidade para os índices de agregação (DMP, DMG e AGRI) evidencia que a estabilidade estrutural dos solos avaliados varia de forma diferenciada ao longo do perfil em Uberaba, refletindo a influência das características intrínsecas e da dinâmica de agregação em cada solo (Tabela 8).

Tabela 8 – Desdobramento das interações significativas do diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice de estabilidade de agregados (IEA) e porcentagem de agregados com diâmetro superior a 2 mm (AGRI), em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025.

PROF (P)	Tipos de solo (TS)		
	DMP	DMG	AGRI
m	mm.....		%
LV			
0,00-0,10	4,76 aA	4,29 aA	94,11 aA
0,10-0,20	4,60 aA	4,06 aA	91,87 aA
LVA			
0,00-0,10	4,76 aA	4,25 aA	93,86 aA
0,10-0,20	4,36 bA	3,33 bB	85,28 aB
CA			
0,00-0,10	4,68 aA	4,03 aA	92,41 aA
0,10-0,20	4,65 aA	3,95 aA	91,83 aA
GH			
0,00-0,10	4,49 aA	3,55 aA	88,32 aA
0,10-0,20	4,43 aA	3,39 aB	87,26 aA
GM			
0,00-0,10	4,08 aB	2,29 aB	80,63 aB
0,10-0,20	4,04 aB	2,20 aC	80,04 aB
CV (%)	5,30	12,56	5,12

**Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam as profundidades na mesma área e maiúsculas nas colunas comparam as mesmas profundidades entre sistemas de manejo, que não diferem entre si pelo teste de Scott & Knott ($p < 0,05$). CV% = Coeficiente de variação; LV = Latossolo Vermelho; LVA =

Latossolo Vermelho-Amarelo; CA = Cambissolo; GH = Gleissolo Háptico e; GM = Gleissolo Melânico (GM), PROF = Profundidade.

Fonte: Resultados Originais da pesquisa (2025).

A dinâmica dos micronutrientes observada ao longo da topossequência está diretamente relacionada às condições de drenagem e ao teor de matéria orgânica dos solos. Em ambientes bem drenados, a maior oxigenação favorece a disponibilidade de elementos como manganês e zinco, enquanto em solos hidromórficos ocorre a redução de elementos como ferro e manganês, alterando sua disponibilidade. Silva *et al.* (2022) destacam que essas variações estão associadas à interação entre fatores químicos e físicos do solo, evidenciando que a fertilidade deve ser interpretada de forma integrada. Além disso, ambientes com maior teor de matéria orgânica tendem a apresentar maior capacidade de retenção e complexação desses elementos.

A Tabela 8 apresenta os teores de micronutrientes essenciais, incluindo manganês (Mn), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe) e zinco (Zn), evidenciando elevada variabilidade entre os diferentes tipos de solo. Destacam-se os elevados teores de ferro nos Gleissolos Hápticos e Cambissolos, associados à presença de óxidos de ferro na mineralogia desses solos. O Gleissolo Melânico apresentou menores valores de Mn e Cu na camada superficial, comportamento típico de ambientes hidromórficos, nos quais as condições redutoras influenciam a disponibilidade desses elementos. Por outro lado, o Cambissolo apresentou maiores teores de Cu e Zn, indicando maior disponibilidade natural desses micronutrientes.

Os testes F indicaram diferenças significativas entre os tipos de solo para todos os micronutrientes avaliados, além de interação significativa para variáveis como Mn, Cu, Fe e Zn, evidenciando a influência conjunta da profundidade e das características pedológicas. Observou-se que a profundidade não influenciou significativamente os teores de B e Cu, que apresentaram comportamento relativamente estável ao longo do perfil. Esses resultados demonstram que a dinâmica dos micronutrientes está diretamente relacionada à mineralogia, ao teor de matéria orgânica e ao regime hídrico, fatores determinantes para a disponibilidade e mobilidade desses elementos no solo.

A distribuição dos micronutrientes reflete diferenças marcantes entre os solos, especialmente em função da mineralogia e das condições hidrológicas. Solos com maior presença de óxidos apresentam maiores teores de ferro, enquanto elementos como Mn e Zn tendem a ser mais abundantes em ambientes bem drenados. Nos Gleissolos, as condições redutoras limitam a disponibilidade de micronutrientes como Cu e Mn, afetando sua dinâmica no solo. Estudos como os de Freitas *et al.* (2018) e Pereira e Pereira (2024) confirmam essa

relação, enquanto Júnior *et al.* (2020) destacam a influência do pH, da matéria orgânica e da drenagem na distribuição desses elementos, explicando a heterogeneidade observada ao longo da toposequência.

De modo geral, os valores de diâmetro médio ponderado (DMP) apresentaram pouca variação entre as profundidades para a maioria dos solos, indicando relativa estabilidade dos macroagregados ao longo do perfil. Esse comportamento sugere que os agregados de maior diâmetro são estruturalmente mais resistentes à desagregação, especialmente em solos tropicais altamente intemperizados, onde a presença de óxidos de ferro e alumínio contribui para a coesão estrutural (Oades, 1984).

No entanto, ao considerar o diâmetro médio geométrico (DMG), observam-se diferenças mais sensíveis à profundidade. No LVA, houve redução significativa do DMG na camada de 0,10–0,20 m, acompanhada pela diminuição da porcentagem de agregados > 2 mm (AGRI). Esse padrão indica maior suscetibilidade à desagregação em subsuperfície, sugerindo perda de estabilidade estrutural, possivelmente associada à menor proteção da matéria orgânica e maior impacto do manejo. Esse comportamento é consistente com observações em solos do Cerrado sob uso agrícola intensivo, onde a estabilidade dos agregados tende a diminuir em profundidade (Cherubin *et al.*, 2016).

Para o solo LV, não foram observadas diferenças significativas entre profundidades para DMP, DMG e AGRI, indicando elevada estabilidade estrutural ao longo do perfil. Esse comportamento sugere maior resistência à degradação estrutural, possivelmente associada à mineralogia e à estrutura típica de Latossolos, caracterizados por elevada estabilidade de agregados (Six *et al.*, 2004).

O solo CA também apresentou estabilidade nos índices avaliados, com pequenas variações entre as profundidades, reforçando a ideia de maior uniformidade estrutural ao longo do perfil. Esse comportamento pode estar relacionado a características texturais e ao arranjo das partículas do solo, que conferem maior resistência à desagregação.

No GH, embora o DMP tenha permanecido estável, o DMG apresentou redução em profundidade, indicando alterações na distribuição dos agregados, com possível aumento relativo de frações menores. Esse comportamento sugere rearranjos estruturais no perfil, possivelmente influenciados pela dinâmica hídrica e pela atividade biológica, fatores relevantes em solos com características hidromórficas (Tisdall; Oades, 1982).

O GM apresentou os menores valores de DMP, DMG e AGRI em ambas as profundidades, sem diferenças significativas ao longo do perfil. Esse padrão indica baixa estabilidade estrutural e reduzida capacidade de formação de agregados estáveis, corroborando

os resultados observados nas tabelas anteriores. Solos com esse comportamento tendem a apresentar maior vulnerabilidade à degradação física, especialmente sob condições de manejo intensivo (Le Bissonnais, 1996).

Na comparação entre solos dentro de cada profundidade, observa-se que LV, LVA e CA apresentam os maiores valores de DMP e DMG, enquanto o GM apresenta os menores, diferindo significativamente dos demais. Esses resultados reforçam a influência das características intrínsecas dos solos na estabilidade estrutural, destacando a importância da mineralogia e da matéria orgânica na formação de agregados estáveis.

De forma geral, os resultados indicam que a estabilidade estrutural é mais preservada em solos como LV e CA, enquanto o LVA apresenta maior sensibilidade à profundidade e o GM apresenta limitações estruturais intrínsecas. A redução dos índices de agregação em profundidade, especialmente para DMG e AGRI, reforça a ocorrência de processos de degradação estrutural subsuperficial, frequentemente associados à compactação e à redução do teor de matéria orgânica (Bünemann *et al.*, 2018).

Esses resultados destacam a importância da adoção de práticas de manejo conservacionistas, como o aumento do aporte de resíduos vegetais e a redução da mobilização do solo, visando à manutenção da estabilidade dos agregados e à melhoria da qualidade física dos solos do Cerrado.

De forma integrada, os resultados dos atributos físicos do solo evidenciam que a qualidade estrutural varia entre os diferentes tipos de solo avaliados, com destaque para Latossolos e Cambissolos, que apresentaram melhores condições físicas, caracterizadas por maior estabilidade de agregados, maior proporção de macroagregados e melhor distribuição do sistema poroso. Por outro lado, solos como o Gleissolo Melânico apresentaram limitações estruturais, com maior participação de frações finas e menores índices de agregação, indicando maior suscetibilidade à degradação física.

Além disso, verificou-se que a camada superficial (0,00–0,10 m) apresentou, de modo geral, melhores atributos físicos em comparação à subsuperficial, refletindo a maior influência da matéria orgânica e da atividade biológica na formação e estabilização da estrutura do solo. Esses resultados reforçam a importância da adoção de práticas de manejo conservacionistas para a manutenção da qualidade física dos solos do Cerrado. Nesse contexto, considerando a estreita relação entre os atributos físicos e a dinâmica de nutrientes no solo, torna-se fundamental avaliar também os atributos químicos, a fim de compreender de forma integrada o funcionamento dos sistemas de manejo e sua influência sobre a fertilidade e a sustentabilidade dos solos avaliados.

Os atributos químicos do solo foram significativamente influenciados pelos tipos de solo avaliados em Uberaba, evidenciando diferenças marcantes na fertilidade entre as classes estudadas, enquanto o efeito da profundidade foi menos expressivo para a maioria dos atributos (Tabela 9).

Tabela 9 – Valor do potencial hidrogeniônico (pH), teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), alumínio (Al), hidrogênio + alumínio (H + Al) e matéria orgânica (MO), em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025.

PROF	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	MO
m	Ca Cl ₂	mg dm ⁻³	mmolc dm ⁻³					g dm ⁻³
Tipo de solo (TS)								
LV	4,04 b	14,01 b	1,02 c	2,38 a	1,22 a	2,85 d	46,00 c	18,02 b
LVA	4,12 a	12,91 b	0,76 d	2,50 a	0,70 c	2,15 c	44,40 c	22,82 b
CA	3,78 c	15,06 b	1,78 b	1,59 c	0,95 b	2,10 b	49,50 b	18,36 b
GH	3,78 c	14,64 b	2,09 a	2,33 a	1,32 a	2,61 c	50,30 b	19,24 b
GM	3,97 b	62,00 a	1,02 c	2,13 b	0,74 c	1,35 a	93,30 a	64,11 a
Profundidade (P)								
0,00-0,10	3,93 a	24,12 a	1,35 a	2,07 b	0,97 a	5,54 a	55,60 b	28,13 a
0,10-0,20	3,94 a	23,33 a	1,32 a	2,30 a	1,00	5,68 a	57,80 a	28,89 a
Teste F TS	21,67**	587,10**	253,34**	20,91**	21,64**	109,68244,27**		
						**		208,80**
Teste F P	0,17 ^{ns}	2,12 ^{ns}	0,54 ^{ns}	7,77**	0,23 ^{ns}	2,64 ^{ns}	5,20*	0,36 ^{ns}
Teste F	1,03 ^{ns}	1,15 ^{ns}	70,48**	29,70**	27,69**		6,45**	
TSxP						1,20**		2,88**
CV (%) TS	2,65	11,77	8,48	11,35	19,18	9,43	7,35	15,34
CV (%) P	2,60	8,02	10,11	13,22	21,12	9,61	6,02	15,69

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam os tipos de solo e as profundidades entre sistemas de manejo, que não diferem entre si pelo teste de Scott & Knott ($p < 0,05$). LV = Latossolo Vermelho; LVA = Latossolo Vermelho-Amarelo; CA = Cambissolo; GH = Gleissolo Háptico e; GM = Gleissolo Melânico (GM); PROF = Profundidade. CV (%) = Coeficiente de variação.

A distribuição do carbono ao longo da topossequência evidencia a forte influência das condições ambientais sobre o acúmulo e a estabilização da matéria orgânica no solo. Os maiores valores observados nos Gleissolos indicam que ambientes hidromórficos atuam como importantes reservatórios de carbono, devido à redução da atividade microbiana e à menor taxa

de decomposição da matéria orgânica. Estudos como os de Florence *et al.* (2021) e Mayer (2024) demonstram que solos com maior teor de umidade e menor aeração apresentam maior potencial de sequestro de carbono, reforçando o papel desses ambientes na mitigação das mudanças climáticas.

Além disso, a manutenção do carbono no solo está diretamente relacionada à sua proteção física e química, especialmente em sistemas pouco perturbados. De acordo com Lavalley, Soong e Cotrufo (2020), a associação da matéria orgânica com partículas minerais aumenta sua estabilidade e reduz sua decomposição, contribuindo para o acúmulo de carbono ao longo do tempo. Nesse contexto, os resultados obtidos neste estudo evidenciam que a posição na paisagem, associada ao regime hídrico e à dinâmica pedogenética, desempenha papel determinante na distribuição e conservação do carbono nos solos tropicais.

A análise estatística evidenciou diferenças significativas entre os tipos de solo para todas as variáveis avaliadas, indicando que a capacidade de armazenamento de carbono é fortemente condicionada por fatores pedogenéticos e pelas características intrínsecas de cada classe de solo. A profundidade, por sua vez, não apresentou efeito significativo para o carbono orgânico total (COT) e o estoque de carbono (EstC), sugerindo relativa estabilidade vertical desses atributos nas camadas analisadas. A interação entre tipo de solo e profundidade (TS $\times$ Prof) foi significativa apenas para o COT, demonstrando que a distribuição do carbono orgânico varia de forma diferenciada entre os solos ao longo do perfil. Nesse contexto, a Tabela 9 evidencia o papel determinante dos ambientes pedológicos na dinâmica do carbono, destacando a relevância dos Gleissolos como importantes componentes no sequestro de carbono no solo.

Os maiores valores de carbono orgânico total e estoque de carbono observados nos solos hidromórficos, especialmente no Gleissolo Melânico, confirmam o papel desses ambientes como importantes reservatórios de carbono, resultado das condições de saturação hídrica que reduzem a taxa de decomposição da matéria orgânica (Troian *et al.*, 2020). Em contraste, os Latossolos apresentaram menores estoques de carbono, associados à maior aeração e à intensificação dos processos de mineralização em ambientes bem drenados e altamente intemperizados. Estudos como o de Rocha (2025) demonstram que a posição na paisagem exerce influência direta sobre o acúmulo de carbono, sendo as áreas hidromórficas fundamentais para a mitigação de emissões de carbono e para a regulação dos ciclos biogeoquímicos. Dessa forma, os resultados obtidos corroboram evidências da literatura que

destacam a importância das topossequências e do regime hídrico na distribuição e dinâmica do carbono no solo.

Os valores de pH variaram entre 3,78 e 4,12, caracterizando solos fortemente ácidos, condição típica de solos altamente intemperizados do Cerrado. O LVA apresentou o maior valor de pH, enquanto CA e GH apresentaram os menores. A elevada acidez nesses solos está associada à presença de alumínio trocável e à baixa saturação por bases, fatores que limitam a disponibilidade de nutrientes às plantas, conforme discutido por Sousa e Lobato (2004). Esses autores destacam que a acidez é uma das principais limitações químicas em solos do Cerrado, exigindo manejo adequado para correção.

Os teores de fósforo (P) foram significativamente superiores no GM em relação aos demais solos. Em solos tropicais, a disponibilidade de fósforo é geralmente baixa devido à forte adsorção por óxidos de ferro e alumínio, sendo fortemente influenciada pela matéria orgânica e pela mineralogia do solo (Novais *et al.*, 2007; Raij, 2011). O maior teor de P no GM pode estar associado ao elevado conteúdo de matéria orgânica, que contribui para a ciclagem e disponibilização desse nutriente.

Para o potássio (K), o GH apresentou os maiores valores, seguido pelo CA, enquanto o LVA apresentou os menores teores. O potássio é um nutriente relativamente móvel no solo, e sua dinâmica está relacionada à capacidade de troca de cátions e à textura do solo. Segundo Raij (2011), solos com maior teor de argila e matéria orgânica tendem a apresentar maior retenção de K, o que pode explicar as diferenças observadas entre os solos.

Os teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) foram mais elevados nos solos LV, LVA e GH, indicando maior disponibilidade de bases nesses solos. Esses cátions desempenham papel fundamental na fertilidade do solo e influenciam diretamente a estrutura, promovendo a floculação das partículas e contribuindo para a estabilidade dos agregados (Bronick; Lal, 2005). Essa relação reforça a conexão entre atributos químicos e físicos observada nas tabelas anteriores.

Os maiores teores de alumínio (Al) foram observados no GM e CA, refletindo maior acidez ativa nesses solos. Esse resultado é corroborado pelos elevados valores de H^+Al , especialmente no GM, indicando alta acidez potencial e maior capacidade tampão. Solos com elevada acidez potencial apresentam maior dificuldade de correção, exigindo maiores doses de corretivos (Novais *et al.*, 2007; Sousa e Lobato, 2004).

A matéria orgânica (MO) apresentou valores significativamente superior no GM, destacando-se dos demais solos. A matéria orgânica exerce papel central na fertilidade do solo, influenciando a capacidade de troca catiônica, a retenção de nutrientes e a atividade biológica.

Além disso, sua relação com a estrutura do solo é amplamente reconhecida, sendo um dos principais agentes na formação e estabilização de agregados (Six *et al.*, 2004; Bünemann *et al.*, 2018).

Em relação à profundidade, observou-se efeito significativo apenas para Ca e H+Al, com maiores valores de cálcio na camada subsuperficial e maior acidez potencial em profundidade. Esse comportamento pode estar relacionado à redistribuição de bases no perfil e ao acúmulo de cargas ácidas nas camadas mais profundas, conforme descrito para solos tropicais altamente intemperizados (Sousa; Lobato, 2004).

A interação significativa entre tipo de solo e profundidade para K, Ca, Mg, Al e H+Al demonstra que a dinâmica desses nutrientes varia conforme o solo e a posição no perfil, refletindo a influência da mineralogia, textura e histórico de manejo. Essa variabilidade reforça a necessidade de práticas de manejo específicas para cada condição edafoclimática.

De forma geral, os resultados evidenciam que os solos avaliados apresentam elevada acidez, variabilidade na disponibilidade de bases e forte influência da matéria orgânica na dinâmica química. A integração desses resultados com os atributos físicos previamente discutidos indica que a qualidade do solo no Cerrado é resultado da interação entre propriedades químicas e estruturais, sendo essencial a adoção de práticas de manejo que promovam simultaneamente a fertilidade e a estabilidade estrutural.

O desdobramento da interação entre tipo de solo e profundidade para os atributos químicos evidencia que a dinâmica dos nutrientes no perfil varia de forma expressiva entre os solos avaliados em Uberaba, refletindo diferenças na mineralogia, teor de matéria orgânica e processos de redistribuição ao longo do perfil (Tabela 10).

Para o potássio (K), observou-se aumento significativo em profundidade nos solos LV e CA, enquanto no GH ocorreu redução. Esse comportamento pode ser explicado pela elevada mobilidade do K no solo, especialmente em sistemas com baixa capacidade de retenção e maior intensidade de lixiviação. De acordo com Raij (2011), o potássio apresenta dinâmica dependente do equilíbrio entre a fase sólida e a solução do solo, podendo ser redistribuído ao longo do perfil. Estudos mais recentes também indicam que a dinâmica do K em solos tropicais está fortemente associada à mineralogia da fração argila e à presença de cargas variáveis (Zörb *et al.*, 2014; Rosolem *et al.*, 2010).

Os teores de cálcio (Ca) apresentaram aumento em profundidade nos solos LV, CA e GM, enquanto no GH houve redução significativa. Esse padrão indica movimentação de bases no perfil, resultado típico de processos de lixiviação em solos do Cerrado. Sousa e Lobato (2004) destacam que, em sistemas tropicais, a redistribuição de Ca é comum, especialmente em

solos sob manejo agrícola. Além disso, estudos recentes reforçam que a dinâmica do cálcio está associada à estrutura do solo e à porosidade, influenciando diretamente sua mobilidade no perfil (Costa *et al.*, 2015).

Tabela 10 – Desdobramento das interações do potencial hidrogeniônico (pH), teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), alumínio (Al), hidrogênio + alumínio (H + Al) e matéria orgânica (MO), em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025

PROF	K	Ca	Mg	Al	H + Al	MO
m	mmolc dm ⁻³				g dm ⁻³	
LV						
0,00-0,10	0,88 cB	2,18 bB	1,10 bA	2,90 aD	46,40 aB	16,84 cA
0,10-0,20	1,16 cA	2,58 bA	1,34 aA	2,80 aD	45,60 aB	19,20 bA
LVA						
0,00-0,10	0,68 dA	2,52 bA	0,68 cA	2,40 aD	45,80 aB	24,88 bA
0,10-0,20	0,84 dA	2,48 bA	0,72 bA	1,90 aE	43,00 aB	20,84 bA
CA						
0,00-0,10	1,58 bB	1,36 bB	0,68 cB	9,30 aB	48,40 aB	17,80 cA
0,10-0,20	1,98 aA	1,82 cA	1,22 aA	8,90 aB	50,60 aB	18,92 bA
GH						
0,00-0,10	2,74 aA	2,94 aA	1,90 aA	7,90 aC	49,80 aB	20,98 bA
0,10-0,20	1,44 bB	1,82 cB	0,74 bB	7,32 aC	50,80 aB	17,50 bA
GM						
0,00-0,10	0,86 cB	1,36 cB	0,50 cB	10,20 bA	87,60 aA	60,22 aB
0,10-0,20	1,18 cA	2,90 aA	0,98 bA	12,50 aA	99,00 aA	68,00 aA
CV (%) TS	9,25	12,01	20,04	9,55	6,42	15,42

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam as profundidades na mesma área e maiúsculas nas colunas comparam as mesmas profundidades entre sistemas de manejo, que não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). CV% = Coeficiente de variação; LV = Latossolo Vermelho; LVA = Latossolo Vermelho-Amarelo; CA = Cambissolo; GH = Gleissolo Háplico e; GM = Gleissolo Melânico (GM), PROF = Profundidade. Fonte: Resultados Originais da pesquisa (2025).

Para o magnésio (Mg), verificou-se comportamento semelhante ao cálcio, com aumento em profundidade em LV, CA e GM e redução no GH. Esse padrão confirma a atuação conjunta desses cátions básicos na dinâmica da fertilidade do solo, uma vez que ambos são suscetíveis à lixiviação e redistribuição vertical (Novais *et al.*, 2007). Segundo Havlin *et al.* (2014), a

disponibilidade de Mg em solos tropicais está diretamente relacionada à CTC e ao teor de matéria orgânica.

Os teores de alumínio (Al) mantiveram-se relativamente constantes entre profundidades na maioria dos solos, exceto no GM, onde houve aumento significativo em subsuperfície. Esse comportamento indica maior acidez ativa em profundidade, o que pode limitar o crescimento radicular. A toxicidade por Al é um dos principais fatores limitantes em solos ácidos tropicais, afetando a absorção de nutrientes e o desenvolvimento das plantas (Kochian *et al.*, 2015).

A acidez potencial (H+Al) apresentou valores elevados em todos os solos, com destaque para o GM, que apresentou os maiores valores em ambas as profundidades. Esse resultado evidencia a elevada capacidade tampão desse solo, associada à presença de matéria orgânica e cargas dependentes do pH. De acordo com Bünemann *et al.* (2018), solos com maior teor de carbono orgânico tendem a apresentar maior capacidade de retenção de cargas e maior estabilidade química.

A matéria orgânica (MO) apresentou comportamento relativamente estável na maioria dos solos, com exceção do GM, onde houve aumento significativo em profundidade. Esse padrão pode estar relacionado à maior estabilização do carbono em subsuperfície, especialmente em ambientes com menor decomposição e maior proteção física da matéria orgânica. Estudos recentes indicam que a estabilização da matéria orgânica está fortemente associada à formação de agregados e à interação com minerais do solo (Six *et al.*, 2004; Lavalley *et al.*, 2020).

Na comparação entre solos, o GH destacou-se pelos maiores teores de K na camada superficial, enquanto o GM apresentou os maiores valores de H+Al e matéria orgânica em ambas as profundidades, evidenciando um ambiente com alta acidez e elevado acúmulo de carbono. Por outro lado, o LVA apresentou menores teores de K e Mg, indicando menor fertilidade relativa.

De forma integrada, os resultados demonstram que a dinâmica dos nutrientes no perfil do solo é altamente dependente do tipo de solo e da profundidade, sendo influenciada por processos como lixiviação, retenção por cargas do solo e interação com a matéria orgânica. Esses resultados reforçam que a avaliação da fertilidade em solos do Cerrado deve considerar a variabilidade vertical, uma vez que alterações no perfil podem impactar diretamente o crescimento radicular e a eficiência de uso de nutrientes (Cherubin *et al.*, 2016).

Além disso, a forte relação entre matéria orgânica, acidez e disponibilidade de nutrientes evidencia que práticas de manejo voltadas ao aumento do carbono no solo são fundamentais para melhorar a fertilidade e a qualidade do solo em sistemas tropicais. Os teores de

micronutrientes foram significativamente influenciados pelos tipos de solo avaliados em Uberaba, enquanto o efeito da profundidade foi menos expressivo para a maioria dos elementos, com exceção do ferro (Fe) e do zinco (Zn) (Tabela 11).

Tabela 11 – Teores de manganês (Mn), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe) e zinco (Zn) em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025

PROF	Mn	B	Cu	Fe	Zn
m	mg dm ⁻³				
Tipo de solo (TS)					
LV	3,68 a	0,25 a	1,38 c	24,32 c	0,27 b
LVA	1,94 b	0,19 b	0,82 d	37,64 b	0,24 b
CA	0,81 c	0,19 a	1,93 a	39,88 b	0,23 b
GH	1,00 c	0,15 b	1,65 b	46,19 a	0,21 b
GM	1,00 c	0,26 a	1,59 b	19,07 c	0,33 a
Profundidade (P)					
0,00-0,10	1,64 a	0,20 a	1,49 a	32,83 b	0,23 b
0,10-0,20	1,73 a	0,21 a	1,46 a	34,01 a	0,28 a
Teste F TS	128,67 **	10,10**	47,71**	172,51**	5,74**
Teste F P	1,45 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,25 ^{ns}	5,33*	15,08**
Teste F TSxP	45,60**	0,97 ^{ns}	2,98*	39,00**	4,69**
CV (%) TS	19,82	22,03	12,89	8,14	24,07
CV (%) P	14,64	24,89	13,34	5,42	19,91

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam os tipos de solo e as profundidades entre sistemas de manejo, que não diferem entre si pelo teste de Scott & Knott ($p < 0,05$). LV = Latossolo Vermelho; LVA = Latossolo Vermelho-Amarelo; CA = Cambissolo; GH = Gleissolo Háplico e; GM = Gleissolo Melânico (GM); PROF = Profundidade. CV (%) = Coeficiente de variação.

Fonte: Resultados Originais da pesquisa (2025).

De maneira geral, observou-se elevada variabilidade entre os solos, refletindo a influência de fatores como pH, matéria orgânica, mineralogia e condições de oxirredução. Em solos tropicais altamente intemperizados, como os do Cerrado, a disponibilidade de micronutrientes está fortemente condicionada por esses fatores (Novais *et al.*, 2007; Havlin *et al.*, 2014).

O manganês (Mn) apresentou maiores teores no LV, diferindo significativamente dos demais solos. Esse comportamento pode estar associado às condições de pH e à maior disponibilidade do elemento em ambientes mais ácidos. De acordo com Fageria *et al.* (2002), a solubilidade do Mn aumenta em condições de pH baixo, sendo um dos micronutrientes mais sensíveis à acidez do solo.

Para o boro (B), os maiores valores foram observados no GM e LV, enquanto GH e LVA apresentaram menores teores. O boro apresenta dinâmica diferenciada em relação aos demais micronutrientes, sendo altamente influenciado pela matéria orgânica e pela textura do solo. Goldberg (1997) destaca que a matéria orgânica atua como importante reservatório de boro, contribuindo para sua disponibilidade, o que explica os maiores valores observados no GM.

O cobre (Cu) apresentou maiores teores no CA, seguido por GH e GM, enquanto o LVA apresentou os menores valores. O cobre apresenta forte afinidade com a matéria orgânica e com óxidos de ferro e alumínio, sendo menos móvel no solo. Segundo Alloway (2008), a disponibilidade de Cu é fortemente controlada pela adsorção em coloides do solo, especialmente em ambientes tropicais.

Os teores de ferro (Fe) foram significativamente maiores no GH, seguidos por CA e LVA, enquanto LV e GM apresentaram menores valores. Esse comportamento pode ser explicado pelas condições hidromórficas do GH, que favorecem a redução do ferro e aumentam sua solubilidade. Em ambientes com maior saturação hídrica, o Fe^{3+} é reduzido a Fe^{2+} , tornando-se mais disponível (Fageria *et al.*, 2002).

O zinco (Zn) apresentou maiores valores no GM, diferindo dos demais solos. A disponibilidade de Zn é fortemente influenciada pelo pH e pela matéria orgânica, sendo maior em condições de maior acidez e presença de compostos orgânicos. Segundo Alloway (2008), solos com maior teor de matéria orgânica podem apresentar maior disponibilidade de Zn devido à formação de complexos orgânicos solúveis.

Em relação à profundidade, não foram observadas diferenças significativas para Mn, B e Cu, indicando relativa homogeneidade desses elementos no perfil avaliado. Por outro lado, o Fe apresentou aumento significativo na camada de 0,10–0,20 m, possivelmente associado a condições de menor aeração e maior umidade em profundidade. O Zn também apresentou maiores valores em subsuperfície, o que pode estar relacionado à redistribuição no perfil e à menor exportação por plantas nessa camada.

A interação significativa entre tipo de solo e profundidade para Mn, Fe e Zn indica que a dinâmica desses micronutrientes varia conforme as características específicas de cada solo.

Essa variabilidade está relacionada principalmente às condições de pH, teor de matéria orgânica e processos redox, fatores fundamentais na disponibilidade de micronutrientes em solos tropicais (Alloway, 2008; Havlin *et al.*, 2014).

De forma integrada, os resultados evidenciam que a disponibilidade de micronutrientes nos solos avaliados é fortemente condicionada pelos atributos químicos e ambientais, especialmente pelo pH, matéria orgânica e regime hídrico. A maior disponibilidade de Fe no GH e de Zn e B no GM reforça a importância das condições específicas de cada solo na dinâmica desses elementos. Além disso, a relação entre micronutrientes e atributos previamente discutidos, como matéria orgânica e acidez, evidencia a necessidade de um manejo integrado da fertilidade do solo, visando garantir o equilíbrio nutricional e a sustentabilidade dos sistemas produtivos no Cerrado.

O desdobramento da interação entre tipo de solo e profundidade para os micronutrientes evidencia que a distribuição desses elementos no perfil do solo varia de forma significativa entre os solos avaliados em Uberaba, refletindo a influência conjunta do pH, da matéria orgânica, da mineralogia e das condições de oxirredução (Tabela 12).

Para o manganês (Mn), observou-se comportamento distinto entre os solos. No LV e GM, houve aumento significativo em profundidade, enquanto no LVA e GH ocorreu redução. Esse padrão evidencia a sensibilidade do Mn às condições químicas e redox do solo. Em ambientes mais úmidos ou com menor aeração, o Mn pode ser reduzido à forma Mn^{2+} , aumentando sua disponibilidade, enquanto em condições mais oxidantes tende a precipitar (Fageria *et al.*, 2002). Além disso, o pH exerce forte controle sobre sua solubilidade, sendo mais disponível em condições ácidas (Alloway, 2008).

Os teores de cobre (Cu) apresentaram menor variação com a profundidade, não havendo diferenças significativas na maioria dos solos, exceto no LVA, onde houve redução em subsuperfície. Esse comportamento está associado à baixa mobilidade do Cu no solo, devido à sua forte adsorção à matéria orgânica e aos óxidos de ferro e alumínio (Alloway, 2008). Essa característica confere maior estabilidade espacial ao elemento no perfil do solo.

Para o ferro (Fe), verificou-se comportamento fortemente influenciado pelas condições do solo. No CA e GM, houve aumento significativo em profundidade, enquanto no LVA e GH ocorreu redução. O GH apresentou os maiores teores de Fe em ambas as profundidades, o que está diretamente relacionado às condições hidromórficas desse solo. Em ambientes com maior saturação hídrica, ocorre a redução do Fe^{3+} para Fe^{2+} , aumentando sua solubilidade e disponibilidade (Fageria *et al.*, 2002). Esse efeito é um dos principais controladores da dinâmica do ferro em solos tropicais.

Tabela 12 – Desdobramento das interações do potencial hidrogeniônico (pH), teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), alumínio (Al), hidrogênio + alumínio (H + Al) e matéria orgânica (MO), em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025
Desdobramento das interações significativas para os teores de manganês (Mn), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe) e zinco (Zn) em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025

PROF	Mn	Cu	Fe	Zn
m	mg dm ⁻³			
LV				
0,00-0,10	2,92 aB	1,34 cA	24,22 dA	0,24 aA
0,10-0,20	4,44 aA	1,42 bA	24,42 cA	0,30 bA
LVA				
0,00-0,10	2,48 bA	1,00 dA	40,66 bA	0,26 aA
0,10-0,20	1,40 bB	0,64 cB	34,62 bB	0,22 cA
CA				
0,00-0,10	0,70 dA	1,96 aA	34,26 cB	0,18 aB
0,10-0,20	0,92 cA	1,90 aA	45,50 aA	0,28 bA
GH				
0,00-0,10	1,40 cA	1,54 bA	48,54 aA	0,20 aA
0,10-0,20	0,60 dB	1,76 aA	43,84 aB	0,22 cA
GM				
0,00-0,10	0,72 dB	1,60 bA	16,46 e B	0,26 aB
0,10-0,20	1,28 bA	1,58 bA	21,68 cA	0,40 aA
CV (%)	16,34	12,35	6,32	2,21

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam as profundidades na mesma área e maiúsculas nas colunas comparam as mesmas profundidades entre sistemas de manejo, que não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). CV (%) = Coeficiente de variação; LV = Latossolo Vermelho; LVA = Latossolo Vermelho-Amarelo; CA = Cambissolo; GH = Gleissolo Háptico e; GM = Gleissolo Melânico (GM), PROF = Profundidade.

Fonte: Resultados Originais da pesquisa (2025).

O zinco (Zn) apresentou aumento em profundidade nos solos CA e GM, enquanto nos demais solos não houve variações significativas. A dinâmica do Zn é fortemente influenciada pelo pH e pela matéria orgânica, sendo mais disponível em condições ácidas e na presença de

compostos orgânicos solúveis (Alloway, 2008). O aumento em profundidade pode estar relacionado à redistribuição no perfil e à menor exportação por plantas nessa camada.

Na comparação entre solos dentro de cada profundidade, o GH destacou-se pelos maiores teores de Fe, enquanto o LV apresentou maiores valores de Mn em profundidade. O GM apresentou aumento expressivo de Zn na camada subsuperficial, indicando possível acúmulo ou menor mobilização desse elemento. Por outro lado, o LVA apresentou redução de Mn e Fe em profundidade, sugerindo menor disponibilidade desses micronutrientes no perfil.

De forma integrada, os resultados evidenciam que a dinâmica dos micronutrientes no solo é altamente dependente das condições edáficas específicas de cada solo, especialmente pH, teor de matéria orgânica e regime hídrico. Esses fatores controlam processos como adsorção, complexação e reações de oxirredução, que determinam a disponibilidade dos micronutrientes (Novais *et al.*, 2007; Havlin *et al.*, 2014).

Além disso, a variabilidade observada no perfil reforça a importância de considerar a distribuição vertical dos micronutrientes na avaliação da fertilidade do solo, uma vez que alterações em profundidade podem impactar diretamente o crescimento radicular e a absorção de nutrientes pelas plantas. Em solos do Cerrado, essa abordagem é essencial para o manejo adequado da fertilidade e para a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

Os atributos relacionados ao carbono do solo foram significativamente influenciados pelos tipos de solo avaliados em Uberaba, evidenciando forte variabilidade entre os ambientes. Por outro lado, a profundidade não influenciou significativamente o carbono orgânico total (COT) e o estoque de carbono (EstC), indicando relativa homogeneidade desses atributos no perfil avaliado (Tabela 13).

Tabela 13 – Desdobramento das interações do potencial hidrogeniônico (pH), teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), alumínio (Al), hidrogênio + alumínio (H + Al) e matéria orgânica (MO), em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025 Densidade do solo (DS), carbono orgânico total (COT) e estoque de carbono (EstC) em cinco diferentes tipos de solo, em Uberaba, MG, 2025

Prof.	DS	COT	EstC
m	kg dm ⁻³	g kg ⁻¹	Mg ha ⁻¹
	Tipo de solo (TS)		
LV	1,41 a	10,43 b	14,71 b
LVA	1,25 b	13,23 b	16,53 b
CA	1,38 a	10,65 b	14,70 b
GH	1,34 a	11,16 b	14,95 b

GM	0,89 c	37,18 a	33,09 a
		Profundidade (P)	
0,00-0,10	1,19 a	16,76 a	19,94 a
0,10-0,20	1,32 b	16,32 a	21,54 a
Teste F TS	51,16**	358,24**	87,83**
Teste F P	27,22**	2,01 ^{ns}	2,63 ^{ns}
Teste F P x TS	2,56 ^{ns}	14,05 ^{ns}	1,48 ^{ns}
CV (%) TS	7,48	11,23	14,55
CV (%) P	6,73	7,29	14,77

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam os tipos de solo e as profundidades entre sistemas de manejo, que não diferem entre si pelo teste de Scott & Knott ($p < 0,05$). LV = Latossolo Vermelho; LVA = Latossolo Vermelho-Amarelo; CA = Cambissolo; GH = Gleissolo Háplico e; GM = Gleissolo Melânico (GM); PROF = Profundidade. CV (%) = Coeficiente de variação.

Fonte: Resultados Originais da pesquisa (2025).

A densidade do solo (DS) apresentou maiores valores nos solos LV, CA e GH, enquanto o GM apresentou valor significativamente inferior. A menor densidade observada no GM está diretamente associada ao maior teor de matéria orgânica, uma vez que o carbono orgânico contribui para a formação de agregados estáveis e aumento da porosidade do solo (Six *et al.*, 2004; Bünemann *et al.*, 2018). Essa relação já havia sido evidenciada nas tabelas anteriores, reforçando a forte interação entre atributos físicos e químicos do solo.

O carbono orgânico total (COT) apresentou valores significativamente superior no GM, destacando-se amplamente dos demais solos. Esse resultado indica maior acúmulo de matéria orgânica nesse ambiente, possivelmente associado a condições de menor decomposição, maior aporte de resíduos orgânicos ou limitações à atividade microbiana. De acordo com Lal (2004), solos com maior teor de carbono orgânico desempenham papel fundamental na melhoria da qualidade do solo, atuando na retenção de nutrientes, na estrutura e na atividade biológica.

O estoque de carbono (EstC) seguiu a mesma tendência do COT, com valores significativamente mais elevados no GM. O estoque de carbono no solo é função direta do teor de carbono orgânico e da densidade do solo, sendo um dos principais indicadores da capacidade do solo em atuar como reservatório de carbono (Batjes, 1996). Nesse sentido, o GM apresenta maior potencial de sequestro de carbono, o que tem implicações importantes do ponto de vista ambiental e climático.

Os menores valores de COT e EstC observados nos solos LV, LVA, CA e GH refletem a condição típica de solos do Cerrado, caracterizados por baixo teor de matéria orgânica devido à elevada taxa de decomposição em condições tropicais (Sousa; Lobato, 2004). Além disso, a maior densidade observada nesses solos pode contribuir para menor proteção física da matéria orgânica, favorecendo sua mineralização (Six *et al.*, 2004).

Em relação à profundidade, observou-se aumento significativo da densidade do solo na camada de 0,10–0,20 m, o que pode estar associado ao maior grau de compactação em subsuperfície. No entanto, o COT e o EstC não diferiram entre as profundidades, indicando distribuição relativamente uniforme do carbono no perfil avaliado. Esse comportamento pode estar relacionado à incorporação de resíduos e à dinâmica do carbono em profundidade, especialmente em sistemas com aporte contínuo de matéria orgânica (Jobbágy e Jackson, 2000).

De forma integrada, os resultados evidenciam que o tipo de solo exerce maior influência sobre o acúmulo e o estoque de carbono do que a profundidade, reforçando a importância das características intrínsecas do solo, como textura, mineralogia e teor de matéria orgânica. Além disso, a forte relação entre carbono, densidade e atributos estruturais confirma que a qualidade do solo no Cerrado depende diretamente da manutenção e do incremento do carbono orgânico.

Sob o ponto de vista do manejo, esses resultados destacam a importância de práticas que promovam o aumento do carbono no solo, como sistemas conservacionistas, uso de plantas de cobertura e redução do revolvimento. Segundo Lal (2004) e Bünemann *et al.* (2018), o incremento do carbono orgânico é uma das principais estratégias para melhorar a qualidade do solo, aumentar a resiliência dos sistemas produtivos e mitigar as mudanças climáticas.

A análise integrada dos atributos físicos, químicos, micronutrientes e do carbono do solo evidencia que a qualidade dos solos avaliados em Uberaba é resultado da interação dinâmica entre suas propriedades estruturais e químicas, sendo fortemente condicionada pelo tipo de solo. De modo geral, os solos com maior teor de matéria orgânica, como o GM, apresentaram melhores condições estruturais, caracterizadas por menor densidade do solo, maior porosidade e maior estabilidade de agregados, o que, por sua vez, favorece a retenção de água, a aeração e a atividade biológica. Essa melhoria estrutural está diretamente associada ao maior acúmulo de carbono orgânico, que atua como agente cimentante na formação e estabilização dos agregados do solo (Six *et al.*, 2004; Bünemann *et al.*, 2018).

Do ponto de vista químico, a maior presença de matéria orgânica também contribuiu para o aumento da capacidade de troca de cátions, maior retenção de nutrientes e maior complexação de elementos potencialmente tóxicos, como o alumínio, influenciando diretamente a fertilidade do solo (Novais *et al.*, 2007). Além disso, a dinâmica dos macronutrientes e micronutrientes mostrou-se fortemente dependente do pH, da mineralogia e das condições redox, especialmente em solos como o GH, onde a disponibilidade de ferro e manganês foi influenciada por condições de maior umidade e redução.

A distribuição dos nutrientes ao longo do perfil do solo evidenciou que processos como lixiviação, redistribuição vertical e interação com a matéria orgânica desempenham papel

fundamental na disponibilidade de nutrientes, afetando diretamente o desenvolvimento radicular e a eficiência de absorção pelas plantas (Havlin *et al.*, 2014). Nesse contexto, a variabilidade observada entre os solos reforça a necessidade de práticas de manejo específicas, adaptadas às características de cada ambiente.

O estoque de carbono destacou-se como um dos principais indicadores da qualidade do solo, integrando aspectos físicos e químicos e refletindo o histórico de uso e manejo. Solos com maior estoque de carbono apresentaram melhor estrutura, maior estabilidade e maior capacidade de retenção de nutrientes, evidenciando seu papel central na sustentabilidade dos sistemas produtivos (Lal, 2004; Jobbágy e Jackson, 2000).

De forma geral, os resultados demonstram que a qualidade do solo no Cerrado depende da manutenção e do incremento do carbono orgânico, que atua como elemento-chave na integração dos atributos físicos e químicos. Assim, práticas de manejo conservacionistas, como o uso de plantas de cobertura, a redução do revolvimento do solo e o aumento do aporte de resíduos orgânicos, são fundamentais para promover a melhoria da fertilidade, da estrutura e da sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

6 CONCLUSÃO

Os atributos físicos, químicos, os micronutrientes e o carbono do solo apresentam variações significativas ao longo da topossequência avaliada em Uberaba. Essas diferenças estão relacionadas, principalmente, ao tipo de solo e à sua posição na paisagem, fatores que exercem maior influência sobre esses atributos do que a profundidade, cuja atuação é mais limitada.

Os resultados evidenciam que solos com maior teor de matéria orgânica, como o Gleissolo Melânico, possuem melhores condições estruturais, com menor densidade e maior capacidade de armazenar carbono. Isso reforça a importância da matéria orgânica para a qualidade do solo, pois além de melhorar suas propriedades físicas, favorece o acúmulo e a estabilização do carbono ao longo do perfil, contribuindo para a manutenção de suas funções ecológicas.

Observou-se também que a disponibilidade de nutrientes e micronutrientes depende, sobretudo, do pH, do teor de matéria orgânica e das condições hidromórficas. Esses fatores variam conforme a posição do solo na paisagem, demonstrando que a topossequência influencia diretamente a dinâmica química e a distribuição dos elementos essenciais ao desenvolvimento das plantas.

Além disso, o estoque de carbono mostrou-se um importante indicador da qualidade do solo, por integrar informações relacionadas aos atributos físicos e químicos. Sua distribuição ao longo da topossequência evidencia como a paisagem interfere nos processos de redistribuição e estabilização do carbono, destacando a relevância desse atributo para a sustentabilidade dos ecossistemas do Cerrado.

De maneira geral, os resultados indicam que a qualidade dos solos do Cerrado está fortemente associada ao teor de matéria orgânica e à posição ocupada na paisagem. Nesse contexto, a adoção de práticas de manejo que preservem a matéria orgânica e favoreçam o acúmulo de carbono é fundamental para a promoção da conservação do solo, manter sua fertilidade e garantir a sustentabilidade dos ambientes ao longo da topossequência.

REFERÊNCIAS

- ABDALA, Vera Lucia; NISHIYAMA, Luiz; TORRES, Jose Luiz Rodrigues. USO DO SOLO E COBERTURA VEGETAL NA BACIA DO ALTO CURSO DO RIO UBERABA. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 12, n. 37, p. 258–267, 2011. DOI: 10.14393/RCG123716436. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/16436>. Acesso em: 23 jun. 2026.
- ALMEIDA, R. G. *et al.* Atributos físicos e estoque de carbono do solo em áreas de pastagens cultivadas em Humaitá, Amazonas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s.l.], v. 17, n. 5, p. 3546–3555, 2024. DOI: 10.26848/rbgf.v17.5.p3546-3555. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf/article/view/261046>. Acesso em: 2 dez. 2025.
- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 337–345, 2004. DOI: 10.1590/S0100-06832004000200012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/mff5y8xXY3tQ3cJHnL6KbXH/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 12 fev. 2026.
- ASSIS, P. C. R. *et al.* Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, e0170350, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170350>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1415-43662015000400309&script=sci_arttext. Acesso em: 11 fev. 2026.
- BATEY, T. Soil compaction and soil management – a review. **Soil Use and Management**, v. 25, n. 4, p. 335–345, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x>. Disponível em: <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x>. Acesso em: 08 mar. 2026.
- BONETTI, J. A. *et al.* Soil physical and biological properties in an integrated crop-livestock system in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, e025700, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2018.v53.25700>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/Z3TQdxXHWf3WnHPR76Tfnjj/?lang=en>. Acesso em: 18 fev. 2026.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 736 p.
- BECK, H. E. *et al.* Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Scientific Data**, London, v. 5, art. 180214, 2018. DOI: 10.1038/sdata.2018.214. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/sdata2018214>. Acesso em: 2 dez. 2025.
- BRITO FILHO, Elilson Gomes de. **Atributos físicos e químicos do solo em três topossequência no Cariri ocidental da Paraíba**. 2023. 31 f. Monografia (Graduação) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Agrárias, Areia. 2023.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. **Soil structure and management: a review**. **Geoderma**, v. 124, n. 1–2, p. 3–22, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706104000898>. Acesso em: 12 fev. 2026.

BÜNEMANN, E. K. *et al.* Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, [s.l.], v. 120, p. 105–125, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071718300294>. Acesso em: 19 mar. 2026.

CHERUBIN, M. R. *et al.* Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Soil and Tillage Research**, [s.l.], v. 163, p. 64–74, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706116300039>. Acesso em: 21 mar. 2026.

COGO, F. D. *et al.* Estoque de carbono orgânico e atributos físicos do solo em um sistema de integração lavoura-floresta e eucalipto no Cerrado Mineiro. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, [s.l.], v. 11, n. 3, p. e18911325774, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i3.25774. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/25774>. Acesso em: 2 dez. 2025.

COSTA, A. A. *et al.* Atributos físicos e estoque de carbono em áreas sob diferentes formas de uso do solo no Cerrado do Oeste da Bahia. **Revista Brasileira de Desenvolvimento**, [s.l.], v. 5, pág. 32294–32306, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n5-612. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/10823>. Acesso em: 2 dez. 2025.

COSTA, N. R. *et al.* Atributos do solo e acúmulo de carbono em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 852–863, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140269>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/N4CH5D7w5xxv4gH5S9gzXdR/?lang=pt>. Acesso em: 14 mar. 2026.

COUTINHO, F. S. *et al.* Estabilidade de agregados e distribuição do carbono em Latossolo sob sistema plantio direto em Uberaba, Minas Gerais. **Comunicata Scientiae, Bom Jesus**, v. 1, p. 100–105, 2010. Disponível em: <http://www.ia.ufrjr.br/lgs/producao/gevasio/2010/10%20Coutinho%202010.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2026.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3–4, p. 201–214, 2004. DOI: 10.1016/j.geoderma.2003.09.004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706103002891>. Acesso em: 26 mar. 2026.

FLORENCE, E. A. S. *et al.* Estoque de Carbono e atributos físicos do solo, sob diferentes usos em pastagens na Amazônia Norte mato-grossense. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, [s.l.], v. 4, n. 2, p. 1902–1909, 2021. DOI: 10.34188/bjaerv4n2-027. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/28922>. Acesso em: 2 dez. 2025.

FONTANA, A. C. *et al.* Caracterização e comportamento físico-hídricos do sistema pedológico da topossequência de solos dourados, Cambira, PR, Brasil. **RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise**, [s.l.], v. 53, p. 182–201, 2021. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/79511>. Acesso em: 18 ago. 2025.

FREITAS, L. *et al.* Estoque de carbono de latossolos em sistemas de manejo natural e alterado. **Ciência Florestal**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 228–239, 2018. DOI: 10.5902/1980509831575. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/31575>. Acesso em: 2 dez. 2025.

FUSHIMI, M. *et al.* Caracterização físico-química de solo raso a desenvolvido (associação neossolo quartzarênico) e solo hidromórfico (associação gleissolo háplico): o contexto ambiental da bacia hidrográfica do rio dos cachorros, São Luís – MA. **Brazilian Geographical Journal, Ituiutaba**, v. 11, n. 1, p. 4-18, jan./jul. 2020. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/braziliangeojournal/article/view/57111>. Acesso em: 07 ago. 2025.

GIÁCOMO, R. G. *et al.* Atributos químicos e físicos do solo, estoques de carbono nitrogênio e frações húmicas em diferentes formações vegetais. **Revista Ciência Florestal**, [s.l.], v. 25, n. 3, p. 617-631, jul-set, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509819613>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/gd9hPS58pDgQbrSrRLvnwxD/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 12 nov. 2025.

HAVLIN, J. L. *et al.* **Soil fertility and fertilizers**: an introduction to nutrient management. 8. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2014.

HORN, R.; WAY, T. Soil compaction and its consequences for plant growth. **Soil and Tillage Research**, v. 82, n. 2, p. 121–145, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198704000595?via%3Dihub>. Acesso em: 18 ago. 2025.

KOCHIAN, L. V. *et al.* Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. **Annual Review of Plant Biology**, v. 66, p. 571–598, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043014-114822>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25621514/>. Acesso em: 11 fev. 2026.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms. **Global Change Biology**, v. 26, p. 261–273, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31587451/>. Acesso em: 19 ago. 2025.

LE BISSONNAIS, Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. **European Journal of Soil Science**, v. 47, n. 4, p. 425–437, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>. Disponível em: https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ejss.4_12311. Acesso em: 11 fev. 2026.

LOSS, A. *et al.* Agregação, carbono e densidade do solo em áreas sob diferentes sistemas de uso no Cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 435–

445, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140394>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbc/a/9pxNYtdqHQg3trtBZm67hWj/>. Acesso em: 11 fev. 2026.

MARCHÃO, R. L. *et al.* Soil physical quality under crop-livestock management systems in a Cerrado Oxisol. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 6, p. 873–882, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2007.v42.7641>. Disponível em: <https://apct.sede.embrapa.br/pab/article/view/7641>. Acesso em: 21 fev. 2026.

MARTINS, J. V. S. *et al.* Physicochemical soil quality in areas under different management systems in the Cerrado. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 12, n. 2, e9284, 2025. DOI: 10.32404/rean.v12i2.9284. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/index.php/agrineo/article/view/9284>. Acesso em: 2 dez. 2025.

MARTINS, J. V. S. **Qualidade física, química e estoque de carbono do solo em áreas sob diferentes sistemas de manejo no cerrado**. 2024, 68 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2021.

MAYER, Giovanna Laura Ribeiro. **Estoque de carbono em Latossolos com diferentes usos na região do Triângulo Mineiro, MG**. 2024. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

NIMMO, J. R. Porosity and pore size distribution. *In*: HILLEL, D. (ed.). **Encyclopedia of Soils in the Environment**. London: Elsevier, 2004. p. 295–303. DOI: <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00447-5>. Disponível em: https://www.rcamnl.wr.usgs.gov/uzf/abs_pubs/papers/nimmo.04.encyc.por.es.pdf. Acesso em: 11 ago. 2025.

NISHIYAMA, Luiz. **Geologia do município de Uberaba e áreas adjacentes**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 1998.

NOVAIS, R. F. *et al.* **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, v. 76, n. 1–3, p. 319–337, 1984. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02205590>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02205590>. Acesso em: 28 fev. 2026.

OLIVEIRA, S. G. de. **Propriedades físico-hídricas de um Gleissolo Háplico sob diferentes cultivos**. 2017, 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus São Evangelista, 2017.

PEREIRA, A. P.; PEREIRA, M. G. **Compêndio de solos do Brasil**. Santa Maria: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2024. E-book. Disponível em: https://www.sbcs-nrs.org.br/docs/2024_livro_compedio_de_solos.pdf. Acesso em: 24 ago. 2025.

PINHEIRO JUNIOR, Carlos Roberto *et al.* Solos do Brasil: gênese, classificação e limitações ao uso. In: RIBEIRO, Júlio César (org.). **Ciências Exatas e da Terra: conhecimentos estratégicos para o desenvolvimento do país**. Ponta Grossa: Atena, 2020. E-book. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/post/solos-do-brasil-genese-classificacao-e-limitacoes-ao-uso>. Acesso em: 19 ago. 2025.

RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2011.

REICHERT, J. M. *et al.* Temporal variation of soil physical properties and maize yield in no-tillage systems. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 102, n. 1, p. 128–136, 2009.

REINERT, D. J. *et al.* Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1805–1816, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000500002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/5WjW8tsqwwWS6xRyMftbvJM/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 21 fev. 2026.

RIBEIRO, J. M. *et al.* Fertilidade do solo e estoques de carbono e nitrogênio sob sistemas agroflorestais no Cerrado Mineiro. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 2, p. 913-923, abr./jun. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/6ZjMM3zLh6qWrjBLb5k4mPh/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 19 ago. 2025.

ROCHA, L. L. **Estoque e fracionamentos do carbono em solos de uma topossequência numa área de transição cerrado caatinga do oeste da Bahia**. 2025. 56f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Agrônoma) – Departamento de Ciências Humanas, Campus IX, Universidade do Estado da Bahia. Barreiras, 2025.

ROSA, V. A.; SOARES NETO, J. P. Atributos Físicos e Estoque de Carbono em Sistemas Agroflorestais nos Cerrados do Oeste da Bahia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 12, n. 7, p. 2660–2671, 2020. DOI: 10.26848/rbgf.v12.7.p2660-2671. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/239457>. Acesso em: 2 dez. 2025.

ROSOLEM, C. A. *et al.* Potassium Leaching as Affected by Soil Texture and Residual Fertilization in Tropical Soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 41, n. no. 16, p. p.p. 1934-1943, 4 ago. 2010. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/2d8de9a1-b23a-4c66-bfbf-3dba0eb08393>. Acesso em: 17 fev. 2026.

SALTON, J. C. *et al.* Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 70–79, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.09.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880913003332>. Acesso em: 21 fev. 2026.

SANTOS, G. G. *et al.* Soil physical quality in integrated crop-livestock systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1339–1348, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-921.pab2011.v46.8525>. Disponível em: <https://apct.sede.embrapa.br/pab/article/view/8525>. Acesso em: 16 mar. 2026;

SANTOS, G. B. *et al.* Gleissolo em Ambiente de vereda no chapadão do Urucuia, Oeste da Bahia. **Geographia Meridionalis**, v. 05, n. 01, jan/jun. 2018b. P. 44-56. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/Geographis/article/view/13177>. Acesso em: 25 ago. 2025.

SCHOSSLER, T. R. G. *et al.* Soil physical quality in agricultural systems on the Cerrado of Piauí State, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 90, n. 4, p. 3975–3989, 2018. DOI: 10.1590/0001-3765201820180681. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aabc/a/8x4PdrW5DgxvCR9hCwPj9Wb/>. Acesso em: 8 mar. 2026.

SILVA, C. A. O.; ASSUNÇÃO, H. F.; COSTA, C. H. M. Environmental management and its influence on the quality of cerrado soils. **Revista Ciência Geográfica**, v. 28, n. 1, p. 258–273, 2024. DOI: <https://doi.org/10.18817/26755122.28.1.2024.3640>. Disponível em: <https://ppg.revistas.uema.br/index.php/cienciageografica/article/view/3640>. Acesso em: 27 ago. 2025.

SILVA, G. A. *et al.* Aspectos dos atributos físicos e químicos do solo em ambientes naturais e áreas com sistema agroflorestal no sul do Amazonas. **Scientia Plena**, [s.l.], v. 18, n. 7, 2022. DOI: 10.14808/sci.plena.2022.070205. Disponível em: <https://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/6588>. Acesso em: 2 dez. 2025.

SILVA, M. B. de D. C. *et al.* Sustentabilidade e preservação do solo em instituições de ensino brasileiras (2015-2021): uma avaliação necessária. **Revista Foco**, [s.l.], v. 16, n. 11, p. e3726, 2023. Disponível em: <https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/3726>. Acesso em: 20 ago. 2025.

SIMON, C. P. *et al.* Emissão de Co₂, atributos físicos e carbono orgânico total em diferentes sistemas de preparo do solo. **Nativa**, [s. l.], v. 7, n. 5, p. 494–499, 2019. DOI: 10.31413/nativa.v7i5.6273. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/6273>. Acesso em: 2 dez. 2025.

SIX, J. *et al.* A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, n. 11, p. 1597–1608, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.03.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198704000881>. Acesso em: 12 abr. 2026.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (ed) **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2004.

TAYLOR, S. A.; ASHCROFT, G. L. **Physical edaphology: the physics of irrigated and nonirrigated soils**. Rev. ed. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1972. E-book. Disponível em: <https://archive.org/details/physicaledapholo0000tayl>. Acesso em: 17 jun. 2026.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p. 141–163, 1982. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>. Disponível em:

<https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>. Acesso em: 08 mar. 2026.

TORMENA, C. A. *et al.*, Corn stover harvest and tillage impacts on near-surface soil physical quality. **Soil and Tillage Research**, v. 166, p. 122–130, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.01.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198716302112>. Acesso em: 14 mar. 2026.

TORRES, J. L. R.; FABIAN, A. J. Levantamento topográfico e caracterização da paisagem para planejamento conservacionista numa microbacia hidrográfica de Uberaba. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 7, n. 19, p. 150–159, 2006. DOI: 10.14393/RCG71915496. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15496>. Acesso em: 15 mar. 2026.

TROIAN, D. *et al.* Carbono orgânico e estoque de carbono do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 1447–1469, 2020. DOI: 10.17765/2176-9168.2020v13n4p1447-1469. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/7122>. Acesso em: 2 dez. 2025.

ZÖRB, C.; SENBAYRAM, M.; PEITER, E. Potassium in agriculture – Status and perspectives. **Journal of Plant Physiology**, v. 171, p. 656–669, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161713003611>. Acesso em: 14 nov. 2025.