

Campus Ariquemes
Coordenação do Curso Bacharelado em Agronomia

EDUARDA DOS SANTOS DE FARIA

**IMPACTO DO USO DA TERRA SOBRE O ESTOQUE DE CARBONO E
QUALIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO**

ARIQUEMES, RO
2026

EDUARDA DOS SANTOS DE FARIA

**IMPACTO DO USO DA TERRA SOBRE O ESTOQUE DE CARBONO E
QUALIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO**

Artigo entregue como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), *Campus* Ariquemes, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel, junto ao Curso de Agronomia, sob a orientação do professor Dr. Acácio Bezerra de Mira, e coorientação do professor Dr. Ivanildo Amorim de Oliveira.

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Gerador de Ficha Catalográfica do IFRO.

Faria, Eduarda dos Santos de.

Impacto do uso da terra sobre o estoque de carbono e qualidade da matéria orgânica do solo / Eduarda dos Santos de Faria. - Ariquemes, 2026.

31 f. : il.

Orientador(a): Prof. Dr. Acácio Bezerra de Mira.

Coorientador(a): Prof. Dr. Ivanildo Amorim de Oliveira.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO, Ariquemes, 2026.

1. Amazônia. 2. Carbono lábil. 3. Carbono orgânico do solo. 4. Qualidade do solo. 5. Sistemas de uso da terra. I. Mira, Acácio Bezerra de (orient.). II. Oliveira, Ivanildo Amorim de (coorient.). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO. IV. Título.

Bibliotecário(a) Responsável: Renilce Silva Moraes, CRB-11/906

EDUARDA DOS SANTOS DE FARIA

**IMPACTO DO USO DA TERRA SOBRE O ESTOQUE DE CARBONO E
QUALIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO**

Artigo entregue como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), *Campus* Ariquemes, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel, junto ao Curso de Agronomia, sob a orientação do professor Dr. Acácio Bezerra de Mira, e coorientação do professor Dr. Ivanildo Amorim de Oliveira.

Aprovado em: 30/06/2026 pela banca examinadora.



Documento assinado digitalmente
JUSLEI FIGUEIREDO DA SILVA
Data: 02/07/2026 14:48:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro da Banca



Documento assinado digitalmente
THASSIANE TELLES CONDE
Data: 02/07/2026 16:53:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro da Banca



Documento assinado digitalmente
ACACIO BEZERRA DE MIRA
Data: 02/07/2026 13:09:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador



Documento assinado digitalmente
IVANILDO AMORIM DE OLIVEIRA
Data: 03/07/2026 10:01:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientador

AGRADECIMENTOS

A Deus todo poderoso criador do Céu e da Terra, pela saúde, vida e por tudo de mais sagrado que tive e tenho.

Ao meu esposo Wagner, que com muito amor, oração e compreensão me auxiliou em tudo, sendo sempre meu fiel companheiro.

À minha mãe Rozane, que do Céu me observou finalizar esse trabalho, sendo meu exemplo de mulher forte e determinada.

Ao meu pai, Evandro, e às minhas irmãs, Erika e Eva, pelo incentivo, oração e amor durante essa jornada.

Aos meus amigos que me acompanharam durante toda jornada acadêmica, minha profunda gratidão.

Ao meu orientador Dr. Acácio, que em todos os momentos me auxiliou e, durante minha enfermidade, incentivou com a continuidade das pesquisas.

Ao coorientador Dr. Ivanildo, pelas contribuições.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), pelo apoio institucional e à Fundação Rondônia de Amparo ao Desenvolvimento das Ações Científicas e Tecnológicas e à Pesquisa do Estado de Rondônia (FAPERO), pelo fomento ao projeto de pesquisa que subsidiou este trabalho.

IMPACTO DO USO DA TERRA SOBRE O ESTOQUE DE CARBONO E QUALIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

RESUMO: A conversão da vegetação nativa para sistemas agrícolas modifica a dinâmica da matéria orgânica do solo, porém a magnitude e a direção dessas alterações dependem do sistema de uso da terra, da intensidade de manejo, do aporte de resíduos vegetais e das características pedológicas de cada ambiente. Nesse contexto, indicadores capazes de detectar mudanças nos compartimentos de carbono são fundamentais para compreender os efeitos do uso da terra sobre a qualidade do solo. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a influência de diferentes sistemas de uso da terra sobre os estoques de carbono e a qualidade da matéria orgânica do solo em uma microbacia localizada no município de Rio Crespo, Rondônia. Foram comparados sistemas de mata nativa, agricultura familiar e agricultura intensiva por meio da determinação dos teores e estoques de carbono orgânico total (COT), carbono oxidável por permanganato (POXC) e atributos físicos do solo, considerando diferentes profundidades e classes de agregados. Os dados foram submetidos a modelos lineares mistos, teste de Tukey ($p \leq 0,05$) e análise de componentes principais. Os sistemas de uso da terra influenciaram principalmente os compartimentos mais lábeis do carbono, enquanto os estoques de COT apresentaram baixa capacidade de discriminar os ambientes avaliados. Contrariando o padrão frequentemente descrito para áreas agrícolas, os estoques de COT não foram reduzidos em relação à mata nativa, enquanto a agricultura intensiva apresentou maior estoque acumulado de POXC no perfil de 0–40 cm e maiores conteúdos desse compartimento nas camadas superficiais e intermediárias, especialmente nas frações de agregados de 250–53 μm , <53 μm e no solo total. Esse comportamento indica que o elevado aporte de resíduos culturais e biomassa radicular promovido pela sucessão soja-milho favoreceu a renovação da fração lábil da matéria orgânica, atenuando os efeitos normalmente atribuídos à intensificação agrícola. Em contraste, a agricultura familiar apresentou os menores valores de POXC, refletindo a combinação entre menor aporte anual de resíduos, características do sistema agroflorestal e maior suscetibilidade à erosão superficial, enquanto a mata nativa apresentou comportamento intermediário, evidenciando que a dinâmica da matéria orgânica resulta da interação entre manejo e condições pedológicas. As análises multivariadas corroboraram essa interpretação ao demonstrarem estreita associação entre os compartimentos de carbono e atributos físicos do solo, especialmente textura e estabilidade estrutural. Embora o COT determinado nas diferentes frações físicas tenha apresentado resposta limitada às mudanças de uso da terra, o POXC associado às mesmas classes de agregados discriminou de forma mais consistente os efeitos do manejo, evidenciando maior sensibilidade para detectar modificações na dinâmica e na qualidade da matéria orgânica do solo. Os resultados demonstram que a integração entre o POXC e o fracionamento físico da matéria orgânica constitui uma abordagem mais robusta do que a avaliação isolada do COT para compreender os efeitos do uso da terra sobre a dinâmica do carbono, contribuindo para o monitoramento da qualidade do solo e para a avaliação da sustentabilidade de sistemas agrícolas em ambientes tropicais.

PALAVRAS-CHAVE: Amazônia; carbono lábil; carbono orgânico do solo; qualidade do solo; sistemas de uso da terra.

IMPACT OF LAND USE ON CARBON STOCKS AND SOIL ORGANIC MATTER QUALITY

ABSTRACT: The conversion of native vegetation to agricultural systems modifies soil organic matter dynamics; however, the magnitude and direction of these changes depend on land use, management intensity, plant residue inputs, and soil characteristics. In this context, sensitive indicators of carbon dynamics are essential for assessing the effects of land use on soil quality. This study evaluated the influence of different land-use systems on carbon stocks and soil organic matter quality in a micro-watershed located in Rio Crespo, Rondônia, Brazil. Native forest, family farming, and intensive agriculture systems were compared by determining total organic carbon (TOC), permanganate-oxidizable carbon (POXC), and soil physical attributes, considering different soil depths and aggregate-size fractions. Data were analyzed using linear mixed-effects models, Tukey's test ($p \leq 0.05$), and principal component analysis. Land-use systems primarily affected the labile carbon pools, whereas TOC stocks showed limited ability to discriminate among the evaluated environments. Contrary to the pattern commonly reported for agricultural areas, TOC stocks were not reduced relative to the native forest, whereas intensive agriculture exhibited higher cumulative POXC stocks within the 0–40 cm soil profile and greater POXC contents in the surface and subsurface layers, particularly within the 250–53 μm and <53 μm aggregate fractions and in the bulk soil. These findings indicate that the high annual input of crop residues and root biomass under the soybean–maize succession promoted the renewal of the labile soil organic matter fraction, mitigating the effects commonly associated with agricultural intensification. In contrast, the family farming system exhibited the lowest POXC values, reflecting the combined effects of lower annual residue inputs, agroforestry management characteristics, and greater susceptibility to surface erosion, whereas the native forest showed an intermediate response, indicating that soil organic matter dynamics result from the interaction between management and soil properties. Multivariate analyses supported this interpretation by revealing strong associations between carbon pools and soil physical attributes, particularly texture and structural stability. Although TOC determined within the different physical fractions showed limited sensitivity to land-use changes, POXC associated with the same aggregate fractions more consistently discriminated management effects, demonstrating greater sensitivity to changes in soil organic matter dynamics and quality. These findings demonstrate that integrating POXC with the physical fractionation of soil organic matter provides a more robust approach than TOC alone for assessing land-use effects on carbon dynamics, contributing to soil quality monitoring and the sustainability assessment of agricultural systems in tropical environments.

KEYWORDS: Amazon; labile carbon; soil organic carbon; soil quality; land-use systems.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	7
2 METODOLOGIA.....	10
2.1 Área experimental.....	10
2.2 Coleta de amostras	11
2.3 Análises laboratoriais	11
2.4 Análise estatística	14
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	26
5 REFERÊNCIAS	27

1 INTRODUÇÃO

O solo é um importante fator para sustentação da vida e da biodiversidade terrestre. Entre os atributos do solo relacionados à sustentabilidade agrícola e ambiental, o conteúdo de matéria orgânica é um dos que mais se destaca. A matéria orgânica do solo (MOS) se refere a todos compostos que possuem carbono orgânico no solo, como micro-organismos vivos e mortos, resíduos de plantas e animais parcialmente decompostos, produtos originados da sua decomposição e substâncias orgânicas microbiologicamente e/ou quimicamente alteradas (Roscoe; Machado, 2002). Além de melhorar os atributos físicos e químicos do solo de interesse agrícola, a MOS é um importante reservatório de carbono, que influencia os níveis atmosféricos de dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), ambos gases do efeito estufa (Blum, 2005).

A transição de vegetação natural para a produção agrícola e a intensificação dessa produção têm levado a uma crescente preocupação com a degradação do solo em escala global (Banwart *et al.*, 2019). A conversão de florestas em sistemas agrícolas promove um desequilíbrio na dinâmica de estabilização da MOS, resultando geralmente na redução do conteúdo de carbono orgânico do solo (Stockmann *et al.*, 2013). Isso ocorre principalmente devido a perdas por erosão da camada superficial e pela exposição de frações orgânicas protegidas aos micro-organismos decompositores (Silva *et al.*, 1999). Além disso, quando a adição de matéria orgânica no solo é inferior à taxa de decomposição, o sistema não alcança um novo equilíbrio, tornando-se exaurido e provocando a degradação do solo (Barreto *et al.*, 2006).

As práticas agrícolas influenciam tanto a quantidade quanto a qualidade da MOS, afetando diretamente a labilidade do carbono orgânico e sua suscetibilidade à oxidação e emissão de CO_2 para a atmosfera (Shang; Tiessen, 1997). Fatores, como o revolvimento do solo e a rotação de culturas, exercem um papel significativo nessa dinâmica (Machado *et al.*, 2014). Nesse contexto, sistemas agrícolas com intensidades de manejo contrastantes, como a agricultura familiar e a agricultura intensiva, podem impactar os estoques de carbono orgânico do solo de forma distinta. Embora áreas de agricultura familiar geralmente causem menor degradação devido à maior diversidade de cultivos e menor uso de maquinário pesado, a baixa produção de biomassa e o uso limitado de insumos nessas áreas podem comprometer a adição de matéria orgânica ao solo.

A maneira clássica de se estudar o efeito do manejo sobre a MOS é analisar as alterações do estoque de carbono orgânico total (COT) do solo. Comparar o estoque em vez da concentração de carbono no solo, proporciona uma representação mais precisa dos fatores do local relacionados ao sequestro de carbono e emissões de gases de efeito estufa (Conforti *et al.*, 2016). A quantidade de MOS não é controlada apenas pela concentração de carbono, mas também pelas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Six *et al.*, 2002). Entre essas propriedades, a densidade, a profundidade e a massa efetiva da matriz do solo são as mais importantes (Salomé *et al.*, 2010). As variações nas propriedades físico-químicas são fortemente influenciadas pela morfologia das encostas e pela posição na paisagem, que afetam a profundidade do solo, o desenvolvimento do perfil, a textura e a estrutura, devido aos processos erosivos e deposicionais (Telles *et al.*, 2003). Esse é um dos motivos pelo qual o padrão internacional para avaliar a mudança de estoque de carbono estipula uma amostragem de profundidade fixa, de pelo menos 30 cm, e a correção dos estoques de carbono em função da densidade do solo ao se comparar os estoques de carbono do solo de áreas distintas (Fowler *et al.*, 2023).

A estabilidade da MOS também está intimamente relacionada aos mecanismos de proteção física no solo, especialmente à sua associação com agregados estáveis. Os agregados, formados pela união de partículas minerais e materiais orgânicos, têm papel determinante na proteção do carbono contra a ação microbiana (Six *et al.*, 2002). Em geral, agregados maiores ($>0,250$ mm) tendem a conter formas de carbono mais estabilizadas, enquanto agregados menores ($<0,053$ mm) são mais vulneráveis à decomposição (Shang; Tiessen, 1997). Assim, o estudo da distribuição do carbono nos diferentes tamanhos de agregados permite avaliar o impacto do uso da terra sobre a estabilidade do carbono no solo, fornecendo subsídios importantes para a proposição de práticas de manejo mais sustentáveis (Six *et al.*, 2002; Lal, 2004). O fracionamento físico da MOS, por meio da separação dos agregados por classes de tamanho, permite estimar o grau de proteção conferido ao carbono. Solos sob florestas nativas, por exemplo, geralmente apresentam maior agregação e acúmulo de MOS, enquanto áreas agrícolas tendem a apresentar maior mineralização e menor qualidade estrutural (Roscoe; Machado, 2002; Costa *et al.*, 2003).

Além da compartimentalização física do carbono nos agregados, a estabilidade química das diferentes frações de carbono também é essencial para a compreensão das dinâmicas de estabilização e degradação da MOS. Apesar de ser

um importante indicador de saúde do solo, a alteração no estoque de COT do solo, em resposta às práticas de manejo, é difícil de ser detectada no curto prazo por diversos fatores relacionados à natureza e composição da MOS (Culman *et al.*, 2013). Nesse cenário, frações lábeis de carbono orgânico do solo se mostram mais responsivas a mudanças de manejo. O Carbono Oxidável por Permanganato (Permanganate-Oxidizable Carbon – POXC), por exemplo, tem sido relatado como uma fração de C do solo mais sensível à rotação de culturas e diversidade de culturas do que as frações de C total (Culman *et al.*, 2013; Hurisso *et al.*, 2016). Os valores de POXC estão fortemente relacionados a frações de C orgânico particulado menores e mais pesadas e refletem um compartimento mais processado ou estabilizado de solo C lábil (Culman *et al.*, 2012). Por esta razão, o POXC tem sido cada vez mais utilizado em estudos de saúde do solo para indicar práticas de manejo que promovam a construção ou estabilização da MOS (Weil *et al.*, 2003).

Compreender os impactos das práticas de manejo agrícola sobre os estoques e as frações de carbono orgânico do solo é fundamental para o desenvolvimento de estratégias que conciliem produtividade e sustentabilidade. Estudos voltados para a identificação de indicadores sensíveis, como o POXC, e para a análise de diferentes sistemas de produção agrícola são essenciais para orientar políticas e práticas que promovam a conservação da matéria orgânica do solo. Assim, é possível não apenas mitigar os efeitos da degradação ambiental, mas também garantir a estabilidade dos serviços ecossistêmicos e a viabilidade econômica da agricultura em longo prazo. Nesse contexto, este estudo objetivou avaliar a influência de diferentes sistemas de uso da terra sobre o estoque de carbono orgânico e a qualidade da matéria orgânica do solo em áreas de transição da vegetação nativa para sistemas agrícolas no município de Rio Crespo, Rondônia.

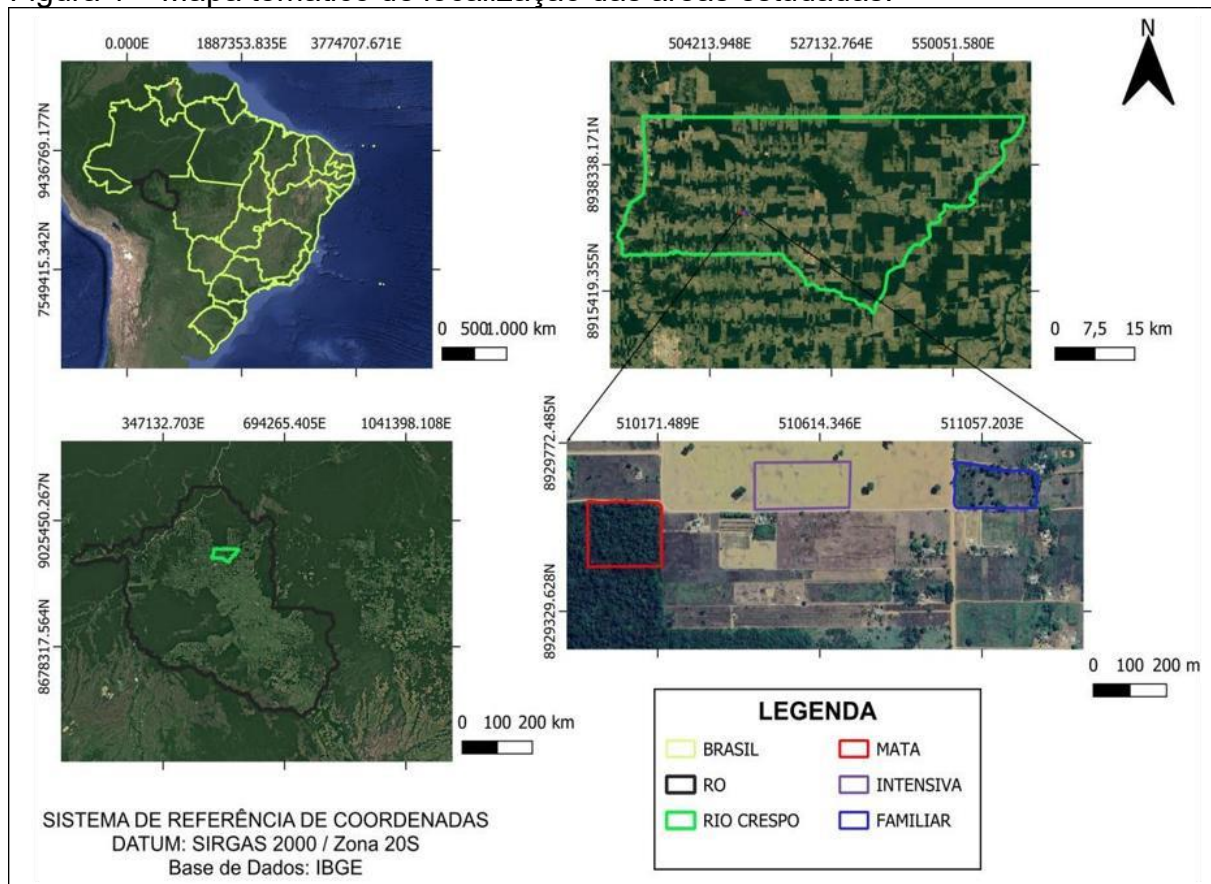
2 METODOLOGIA

2.1 Área experimental

O estudo foi conduzido em uma microbacia localizada no município de Rio Crespo (09°40'58" S; 62°53'56" W; 132 m de altitude). O clima da região é classificado como Aw (tropical chuvoso), segundo Köppen-Geiger, apresentando temperatura média anual entre 28,5 °C e 30,0 °C e precipitação média anual de aproximadamente 2.250 mm (Carvalho *et al.*, 2016). Os solos predominantes na área de estudo são classificados como Latossolos Amarelos Distróficos (Santos *et al.*, 2011).

Foram avaliados três sistemas de uso da terra: (i) mata nativa, (ii) agricultura intensiva, e (iii) agricultura familiar. A mata nativa corresponde a área preservada, empregada como referência para avaliação das alterações dos atributos físicos e na MOS. A Figura 1 apresenta a localização das áreas de mata nativa, agricultura intensiva e agricultura familiar selecionadas para o desenvolvimento do estudo.

Figura 1 – Mapa temático de localização das áreas estudadas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A área de agricultura intensiva permaneceu sob mata até 2013, foi destinada à pastagem entre 2013 e 2016 e, desde 2017, é conduzida com sucessão soja safra e milho segunda safra. A área de agricultura familiar foi convertida em 2001 e apresenta sistema agroflorestal com castanheira (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) desde 2002 e urucum (*Bixa orellana* L.), manejado com podas bienais, renovação a cada seis anos e adubação na ocasião da poda/reforma.

2.2 Coleta de amostras

Na área de cada sistema de uso da terra, foi delimitado um talhão de 40 m × 50 m (2.000 m²), no qual foi estabelecida uma malha amostral regular de 20 m × 20 m, georreferenciada com equipamento portátil de sistema de posicionamento global (GPS). As amostragens foram realizadas nos pontos de interseção da malha, totalizando seis pontos amostrais por talhão.

Para a determinação da densidade do solo foram coletadas amostras indeformadas utilizando trado tipo caneca equipado com anéis volumétricos de aço inoxidável de 5 cm de altura (volume interno 98 cm³), centralizados nas profundidades 5 cm, 15 cm e 30 cm para representar as camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-40 cm, respectivamente (Zanatta; Pulrolnik; Viana, 2015).

Para a determinação dos teores de carbono orgânico total (COT) e carbono orgânico oxidável por permanganato (POXC), foram coletadas amostras compostas nas profundidades de 0–10, 10–20 e 20–40 cm, utilizando-se trado tipo sonda. Cada amostra composta foi formada pela mistura de dez amostras simples coletadas em um raio de 2 m ao redor de cada ponto amostral. Após a coleta, as amostras foram secas ao ar à temperatura ambiente (25 °C) por 72 h, destorroadas manualmente e peneiradas em malha de 2,0 mm para posterior realização das análises laboratoriais.

2.3 Análises laboratoriais

As análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório do Grupo de Pesquisa Solo e Água em Ambientes Amazônicos do Instituto Federal de Rondônia, *Campus Ariquemes*, exceto as análises de COT, conduzidas no Laboratório de Manejo e Conservação do Solo da Universidade Federal de Viçosa, *Campus Florestal* (MG), pela equipe do Grupo de Estudos em Agricultura Regenerativa e Solos.

A densidade do solo foi determinada pelo método do cilindro volumétrico, conforme Teixeira *et al.* (2017). As amostras indeformadas foram transferidas para recipientes de alumínio previamente identificados e de massa conhecida, sendo secas em estufa a 105 °C por 48 h. Após a secagem, a massa de solo seco foi dividida pelo volume do cilindro, e a densidade do solo foi expressa em g cm^{-3} .

Cada uma das amostras compostas foi subdividida em quatro alíquotas. Uma alíquota foi destinada à análise granulométrica e à determinação dos teores de COT e POXC em cada profundidade avaliada. As três alíquotas restantes foram utilizadas para o fracionamento físico dos agregados e posterior determinação dos teores de COT e POXC em cada classe de agregado e profundidade avaliada.

As análises granulométricas foram realizadas com base na velocidade de sedimentação das partículas em suspensão, conforme Teixeira *et al.* (2017). As amostras foram dispersas química e mecanicamente em solução de NaOH, e o tempo de sedimentação foi estabelecido de acordo com a lei de Stokes. A fração argila foi determinada pipetagem da suspensão em profundidade e tempo pré-estabelecidos, seguida de secagem em estufa e pesagem. As frações areia grossa e areia fina foram separadas por tamisação úmida, secas em estufa e pesadas. O teor de silte foi obtido por diferença entre a massa total da amostra e a soma das frações de argila e areia.

O fracionamento dos agregados foi realizado por peneiramento a seco, conforme metodologia adaptada de Wang *et al.* (2014). Aproximadamente 200 g de solo seco, destorroado e peneirado em malha de 2,0 mm foram submetidos a peneiramento sequencial em peneiras de 250 μm e 53 μm , obtendo-se três classes de diâmetro de agregados: >250 μm , 250–53 μm e <53 μm . As peneiras foram agitadas durante três minutos em agitador horizontal operando a 50 Hz. Posteriormente, cada fração foi pesada para determinação da sua participação relativa na massa total da amostra. A partir da distribuição de massa entre as classes de agregados, foi calculado o diâmetro médio ponderado (DMP), conforme metodologia proposta por Kemper e Rosenau (1986). Os resultados foram expressos em milímetros (mm) e utilizados como indicadores da estabilidade estrutural do solo.

O teor de POXC foi determinado conforme o método proposto por Blair *et al.* (1995), com as modificações descritas por Weil *et al.* (2003). Para a análise, 2,5 g de solo foram adicionados a 20 mL de solução contendo 0,02 mol L^{-1} de KMnO_4 (permanganato de potássio) e 0,1 mol L^{-1} de CaCl_2 (cloreto de cálcio). As suspensões foram agitadas por 2 min a 180 rpm e mantidas em repouso por 10 min. Em seguida,

uma alíquota do sobrenadante foi diluída e a absorbância determinada em espectrofotômetro a 550 nm, utilizando-se curva padrão de KMnO_4 para o cálculo das concentrações. Todas as etapas foram conduzidas em ambiente protegido da luz devido à fotossensibilidade do permanganato de potássio.

Os teores de COT foram determinados pelo método de oxidação úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico, seguido da titulação do excesso de dicromato com sulfato ferroso amoniacal, conforme Teixeira *et al.* (2017).

As determinações de POXC e COT foram realizadas tanto nas amostras integrais quanto nas frações obtidas pelo fracionamento dos agregados ($>250\ \mu\text{m}$, $250\text{--}53\ \mu\text{m}$ e $<53\ \mu\text{m}$). Os teores totais de POXC e COT em cada camada do solo foram obtidos a partir das análises realizadas nas amostras integrais não fracionadas, sendo expressos em mg kg^{-1} e g kg^{-1} , respectivamente.

Para avaliar a distribuição da matéria orgânica entre as diferentes classes de agregados, o conteúdo de POXC e de COT associado a cada fração foi calculado a partir dos teores determinados nas respectivas classes granulométricas ($>250\ \mu\text{m}$, $250\text{--}53\ \mu\text{m}$ e $<53\ \mu\text{m}$), ponderados pela participação relativa de cada fração na massa total da amostra. Dessa forma, obteve-se o conteúdo de POXC e de COT associado aos macroagregados, microagregados e fração silte+argila permitindo quantificar o particionamento do carbono entre compartimentos físicos do solo com distintos níveis de proteção e estabilização da MOS nos sistemas de uso da terra avaliados.

Os estoques de carbono foram calculados para cada camada pela multiplicação dos teores de COT pela densidade do solo e pela espessura correspondente. Em seguida, os valores obtidos para as camadas foram somados para representar o estoque total na profundidade de 0–40 cm, conforme Ellert e Bettany (1995). De forma análoga, os estoques de carbono lábil foram estimados a partir dos teores de POXC também multiplicados pela densidade do solo e pela espessura de cada camada, sendo posteriormente somados para a obtenção do estoque na profundidade de 0–40 cm.

Em ambos os casos, os estoques foram corrigidos para massa equivalente de solo na camada de 0–40 cm, conforme Ellert e Bettany (1995), com o objetivo de minimizar os efeitos de variações na densidade do solo entre os sistemas de uso da terra. Os resultados foram expressos em Mg ha^{-1} .

2.4 Análise estatística

Os dados foram analisados considerando a estrutura hierárquica da amostragem, composta por três sistemas de uso da terra (mata nativa, agricultura familiar e agricultura intensiva), seis pontos amostrais por sistema e três profundidades de amostragem (0–10, 10–20 e 20–40 cm).

Para as variáveis avaliadas ao longo do perfil do solo, foram ajustados modelos lineares mistos utilizando o pacote *lme4* no ambiente R. Os sistemas de uso da terra, as profundidades e a interação entre esses fatores foram considerados efeitos fixos, enquanto os pontos amostrais foram considerados unidades experimentais aninhadas aos sistemas de uso da terra, sendo incluídos como efeito aleatório. O modelo adotado foi:

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + P_j + (S \times P)_{ij} + b_{k(i)} + \varepsilon_{ijk} \text{ em que:}$$

Y_{ijk} representa a observação da variável resposta;

μ é a média geral;

S_i é o efeito do sistema de uso da terra;

P_j é o efeito da profundidade;

$(S \times P)_{ij}$ corresponde à interação entre os fatores;

$b_{k(i)}$ é o efeito aleatório do ponto amostral dentro de cada sistema, e;

ε_{ijk} é o erro residual.

Os modelos foram ajustados pelo método da máxima verossimilhança restrita (REML), utilizando a função *lmer()* do pacote *lme4*. A significância dos efeitos fixos foi avaliada por análises de variância do tipo III, empregando o pacote *lmerTest*. Quando a interação sistema × profundidade foi significativa ($p \leq 0,05$), os desdobramentos foram realizados por meio da comparação de médias entre sistemas dentro de cada profundidade. Para as variáveis sem interação significativa, foram avaliados separadamente os efeitos principais de sistema e profundidade.

As médias ajustadas (Estimated Marginal Means – EMMs) foram obtidas utilizando o pacote *emmeans*. As comparações múltiplas de médias foram realizadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, sendo os grupos homogêneos identificados por letras.

Para as variáveis integradas na camada de 0–40 cm, representadas pelos estoques de COT e POXC, foram ajustados modelos mistos contendo apenas o efeito fixo de sistema de uso da terra e o efeito aleatório dos pontos amostrais:

$$Y_{ik} = \mu + S_i + b_{k(i)} + \varepsilon_{ik} \text{ em que:}$$

Y_{ik} é a variável resposta observada na camada integrada de 0–40 cm;

μ é a média geral;

S_i representa o efeito do sistema de uso da terra;

$b_{k(i)}$ é o efeito aleatório do ponto amostral dentro de cada sistema, e;

ε_{ik} representa o erro residual.

As médias ajustadas e as comparações múltiplas seguiram os mesmos procedimentos descritos anteriormente.

Os pressupostos dos modelos foram avaliados por meio da análise dos resíduos. A normalidade foi testada utilizando o teste de Shapiro–Wilk e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. Adicionalmente, foram inspecionados visualmente histogramas, gráficos quantil–quantil (Q-Q plots) e gráficos de resíduos versus valores ajustados para verificar possíveis desvios dos pressupostos de normalidade, homocedasticidade e independência dos erros.

Para explorar os padrões multivariados dos atributos físicos e dos indicadores conteúdo e qualidade da MOS, foi realizada uma Análise de Componentes Principais (ACP; do inglês *Principal Component Analysis*, PCA) utilizando variáveis previamente padronizadas (média zero e variância unitária). A ordenação foi realizada com a função *prcomp()*, e os resultados foram apresentados por meio de biplot contendo escores das amostras, vetores das variáveis e elipses de dispersão dos grupos.

Todas as análises estatísticas foram conduzidas no software R (R Core Team, 2024), utilizando principalmente os pacotes *lme4*, *lmerTest*, *emmeans*, *multcomp*, *DHARMA*, *performance*, *ggplot2* e *patchwork*. Em todas as análises foi adotado o nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância evidenciou que a profundidade exerceu efeito significativo ($p \leq 0,001$) sobre a maior parte dos atributos físicos e dos compartimentos de carbono avaliados, com valores de F superiores aos observados para o uso da terra, especialmente para as variáveis relacionadas ao COT e ao POXC (Tabela 1). Esse resultado indica que a estratificação vertical foi a principal fonte de variação dos atributos do solo, refletindo a distribuição natural da matéria orgânica ao longo do perfil. Tal comportamento está associado à maior deposição de resíduos vegetais, concentração de raízes e atividade biológica nas camadas superficiais, fatores que controlam a entrada, a transformação e a estabilização do carbono orgânico no solo (Jobbágy; Jackson, 2000).

Tabela 1 – Valores de F da análise de variância para os efeitos de uso da terra (U), profundidade (P) e interação U × P sobre os atributos físicos e frações/compartimentos de carbono do solo.

Variável	Uso da terra (U)	Profundidade (P)	U × P	Média	CV (%)
	Fator F				
Areia (g kg ⁻¹)	169,27***	132,92***	15,54***	329,93	4,86
Argila (g kg ⁻¹)	129,15***	64,82***	9,12***	467,91	4,39
Silte (g kg ⁻¹)	6,17*	1,21ns	1,57ns	202,17	8,82
Densidade (g cm ⁻³)	18,55***	57,76***	19,37***	1,45	4,4
DMP (mm)	45,67***	3,16ns	3,66*	0,89	3,01
Teor POXC Macro (mg kg ⁻¹)	3,14ns	72,27***	3,36*	158,76	23,37
Teor POXC Meso (mg kg ⁻¹)	10,34**	39,16***	1,77ns	241,06	33,89
Teor POXC Micro (mg kg ⁻¹)	2,84ns	70,42***	1,73ns	445,5	26,01
Fração POXC Macro (mg kg ⁻¹)	3,26ns	68,74***	3,75*	120,76	23,23
Fração POXC Meso (mg kg ⁻¹)	10,41**	54,18***	1,23ns	49,13	31,41
Fração POXC Micro (mg kg ⁻¹)	6,90**	48,60***	3,55*	16,06	29,94
Fração POXC Total (mg kg ⁻¹)	4,42*	81,54***	3,41*	185,94	22,64
Teor COT Macro (g kg ⁻¹)	1,07ns	59,27***	0,57ns	11,68	12,53
Teor COT Meso (g kg ⁻¹)	8,03**	59,62***	0,26ns	12,31	11,71
Teor COT Micro (g kg ⁻¹)	1,20ns	68,34***	1,67ns	17,26	15,7
Fração COT Macro (g kg ⁻¹)	3,19ns	44,45***	0,68ns	8,91	13,48
Fração COT Meso (g kg ⁻¹)	5,52*	74,18***	1,73ns	2,46	13,5
Fração COT Micro (g kg ⁻¹)	3,68ns	31,39***	2,17ns	0,61	21,11
Fração COT Total (g kg ⁻¹)	0,62ns	73,92***	0,88ns	12,1	13,19
Estoque POXC (Mg ha ⁻¹)	5,53*	56,87***	5,33**	0,33	16,12
Estoque COT (Mg ha ⁻¹)	2,64ns	180,44***	6,60***	22,12	9,22

ns = não significativo ($p > 0,05$); * = significativo a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$); ** = significativo a 1% de probabilidade ($p \leq 0,01$); *** = significativo a 0,1% de probabilidade ($p \leq 0,001$). Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Os atributos texturais diferiram significativamente entre os sistemas de uso da terra, com interação significativa entre uso da terra e profundidade. Esse resultado indica que as diferenças granulométricas não foram uniformes ao longo do perfil do solo, reforçando a importância da textura na interpretação da dinâmica dos compartimentos de carbono. Parte da variação observada nesses compartimentos pode estar relacionada não apenas ao manejo, mas também às características físicas e pedológicas das áreas avaliadas, especialmente ao teor de argila e à presença de óxidos, que desempenham papel fundamental na proteção da matéria orgânica.

O DMP apresentou o menor coeficiente de variação entre as variáveis avaliadas (3,01%) e foi influenciado pelo uso da terra ($p \leq 0,001$), sem efeito isolado da profundidade. Esse resultado indica que a estabilidade estrutural do solo esteve mais associada às condições de manejo e às características físicas dos sistemas do que à profundidade, corroborando a relação entre manejo, carbono orgânico e estabilidade de agregados (Castro Filho; Muzilli; Podanoschi, 1998).

O POXC foi mais sensível às alterações promovidas pelo uso da terra do que o COT, especialmente nas frações de agregados de 250–53 μm e <53 μm , além de evidenciar diferenças nos estoques do solo total. Em contraste, o estoque de COT do solo total não variou significativamente em função do uso da terra, sendo influenciado apenas pela profundidade. Diferenças entre os sistemas de uso foram observadas apenas de forma pontual, quando os estoques foram comparados dentro de cada profundidade. No entanto, essa menor sensibilidade não foi observada em todas as frações, pois o COT associado aos microagregados (250–53 μm) apresentou variações significativas em resposta ao manejo. Esses resultados indicam que os microagregados apresentam sensibilidade intermediária, situando-se entre o COT do solo total, mais estável, e o POXC, mais responsivo às mudanças de uso da terra.

Os valores de densidade do solo apresentaram comportamento distinto do normalmente observado em sistemas agrícolas, com maiores valores na área de mata nativa (Tabela 2). Embora o aumento da densidade seja frequentemente associado ao tráfego de máquinas e ao pisoteio em áreas manejadas (Reichert, Suzuki e Reinert, 2007), os resultados sugerem que, neste estudo, esse atributo foi influenciado principalmente pela composição granulométrica. O maior teor de areia e o menor teor de argila na mata nativa podem ter contribuído para o aumento da densidade, uma vez que solos mais arenosos tendem a apresentar maior densidade aparente devido ao arranjo das partículas e à menor porosidade total (Teixeira et al., 2017).

Tabela 2 – Atributos físicos de densidade do solo e teores das frações granulométricas (areia, silte e argila), sob os diferentes sistemas de uso da terra estudados.

Profundidade (cm)	Mata nativa	Agricultura familiar	Agricultura intensiva
Densidade (g cm ⁻³)			
0-10	1,41 Ba	1,06 Bb	1,49 Ba
10-20	1,54 Aa	1,45 Aa	1,50 ABa
20-40	1,61 Aa	1,50 Ab	1,50 Aab
Argila (g kg ⁻¹)			
0-10	263 Cb	496 Ca	525 Ba
10-20	308 Bb	562 Ba	538 ABa
20-40	382 Ab	582 Aa	555 Aa
Areia (g kg ⁻¹)			
0-10	555 Aa	280 Ab	287 Ab
10-20	488 Ba	223 Bc	276 Ab
20-40	416 Ca	200 Bc	245 Bb
Silte (g kg ⁻¹)			
0-10	182 Ab	224 Aa	188 Ab
10-20	204 Aab	215 Aa	186 Ab
20-40	202 Aa	218 Aa	200 Aa

Médias seguidas de pelo menos uma letra minúscula em comum na linha, ou maiúscula na coluna não difere entre si pelo teste de Tukey, ao nível de significância de 5%. Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

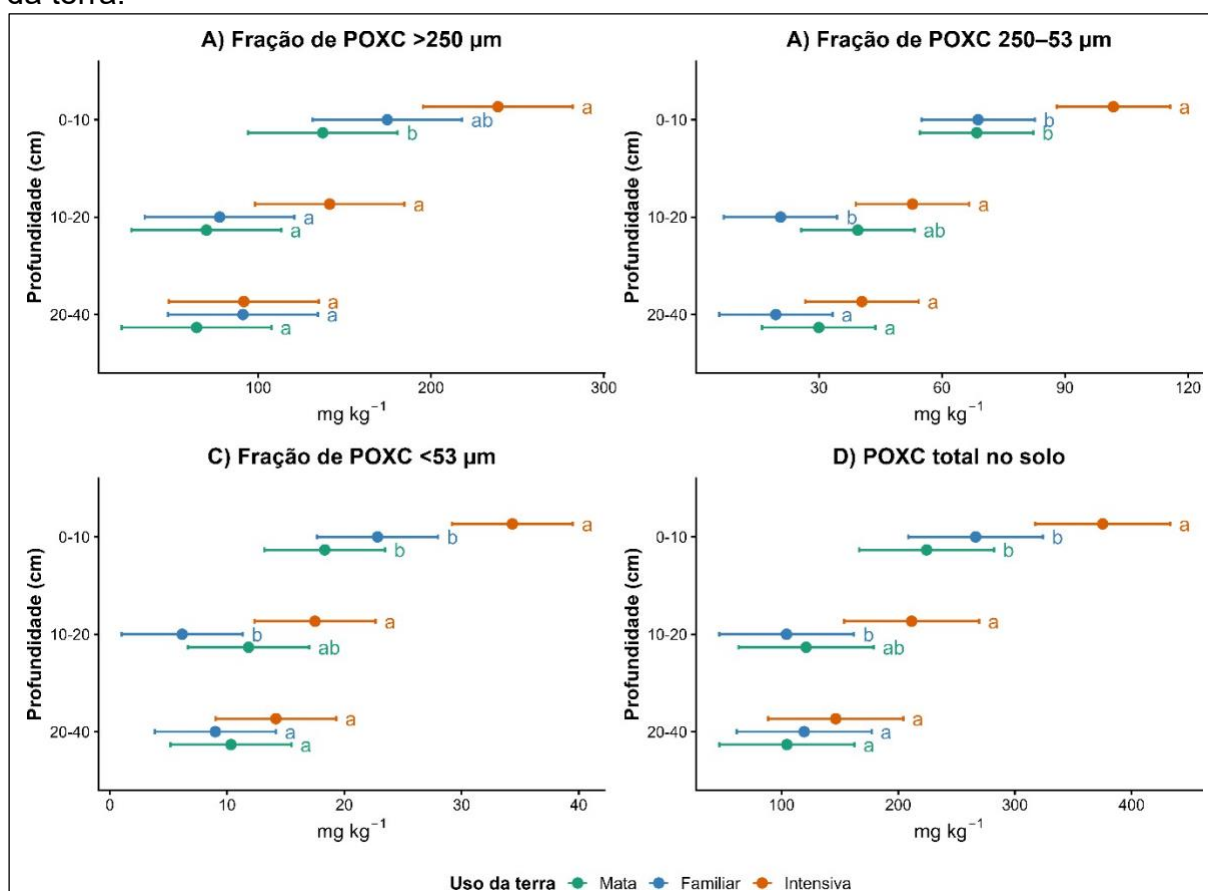
As diferenças observadas na composição granulométrica entre a área de mata e os sistemas agrícolas indicam alterações associadas ao uso e manejo do solo ao longo do tempo. Embora o menor teor de argila na área de mata possa refletir a variabilidade natural do material de origem e a heterogeneidade espacial dos atributos do solo, o aumento relativo dessa fração nos sistemas agrícolas sugere a atuação de processos erosivos e de redistribuição de partículas no perfil do solo. Em ambientes tropicais sob maior intervenção antrópica, a erosão laminar tende a atuar de forma seletiva, removendo preferencialmente partículas mais leves da camada superficial e promovendo o rearranjo das frações remanescentes ao longo do perfil (Silva; Oliveira, 2015). Esse processo resulta não apenas em alterações na textura, mas também em impactos funcionais, uma vez que o aumento relativo de frações finas influencia a retenção de água, a disponibilidade de nutrientes e os mecanismos de estabilização da matéria orgânica por meio de interações organominerais e agregação.

Além das implicações para a dinâmica da água e a susceptibilidade à compactação, alterações na distribuição das frações granulométricas podem influenciar diretamente os mecanismos de estabilização da MOS. A maior participação de argila aumenta a superfície específica disponível para interações organominerais

e favorece a formação de associações entre compostos orgânicos e minerais de baixa cristalinidade, contribuindo para a proteção física e físico-química do carbono no solo. Dessa forma, as diferenças texturais observadas entre os sistemas avaliados podem representar um importante fator condicionante da distribuição e da persistência da matéria orgânica, influenciando tanto o acúmulo quanto a dinâmica de transformação dos compartimentos de carbono analisados (Six *et al.*, 2002).

Os teores de POXC diminuíram com o aumento da profundidade em todos os sistemas avaliados, confirmando a concentração do carbono lábil nas camadas superficiais do solo (Figura 2). Esse padrão está associado ao maior aporte de resíduos vegetais, renovação radicular e atividade microbiana próxima à superfície, fatores que favorecem a formação de compostos orgânicos mais facilmente oxidáveis (Lorenz; Lal, 2018).

Figura 2 – Conteúdo de carbono oxidável por permanganato (POXC) na amostra total de solo e associado aos macroagregados ($>250\ \mu\text{m}$), aos microagregados ($250\text{--}53\ \mu\text{m}$) e à fração silte+argila ($<53\ \mu\text{m}$), em diferentes profundidades e sistemas de uso da terra.



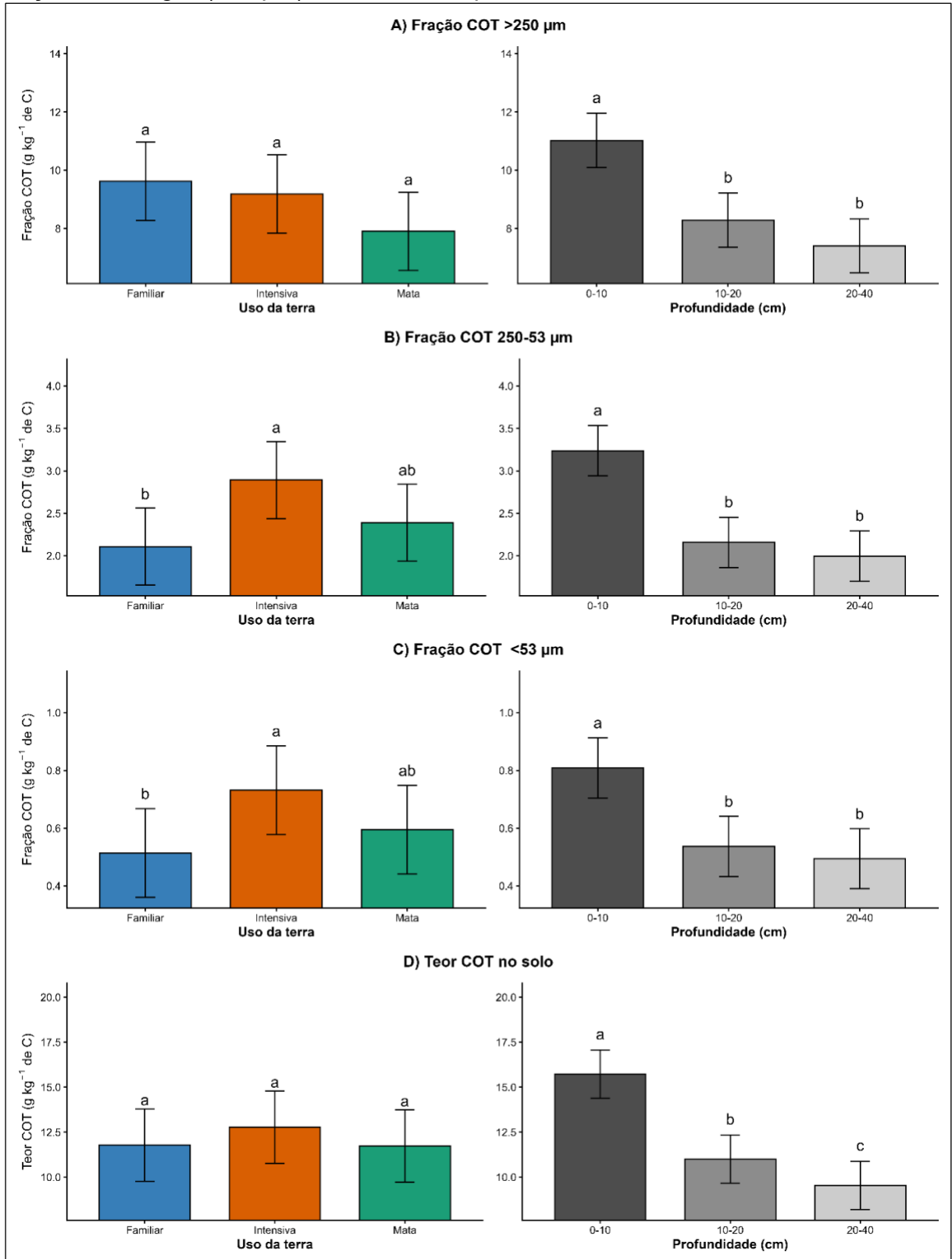
Os pontos representam as médias e as barras de erro indicam o erro padrão da média ($n = 6$); Médias seguidas de pelo menos uma letra minúscula em comum não difere entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% significância. Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A agricultura intensiva apresentou maiores teores de POXC na maioria das profundidades e classes de agregados, possivelmente devido ao aporte recorrente de biomassa aérea e radicular pela sucessão soja-milho (Poeplau *et al.*, 2011). Assim, o POXC mostrou-se adequado para discriminar alterações associadas ao uso da terra que não foram detectadas pelo COT. Contudo, maiores valores de POXC devem ser interpretados como maior acúmulo de carbono lábil nas condições avaliadas, e não como evidência isolada de melhor qualidade global do solo.

Os teores de COT não diferiram significativamente entre os sistemas de uso da terra (Figura 3A) na fração de macroagregados ($>250\ \mu\text{m}$) nem no solo total (Figura 3D), sugerindo menor sensibilidade desse compartimento às alterações de manejo quando comparado ao POXC. Por outro lado, a fração de $250\text{--}53\ \mu\text{m}$ (Figura 3B) apresentou maiores teores de COT na agricultura intensiva em relação à agricultura familiar, possivelmente devido à proteção física da matéria orgânica em agregados intermediários, que reduz a exposição dos compostos orgânicos à decomposição microbiana (Six; Elliott; Paustian, 2000). O aporte recorrente de resíduos da sucessão soja-milho pode ter favorecido o acúmulo de carbono nessa fração, devido à maior entrada de biomassa aérea e radicular no sistema. Em todos os sistemas, o COT diminuiu com a profundidade, refletindo o menor aporte de resíduos e a redução da atividade radicular e microbiana nas camadas subsuperficiais, padrão comum em solos tropicais (Bayer; Mielniczuk, 2008; Lal, 2018).

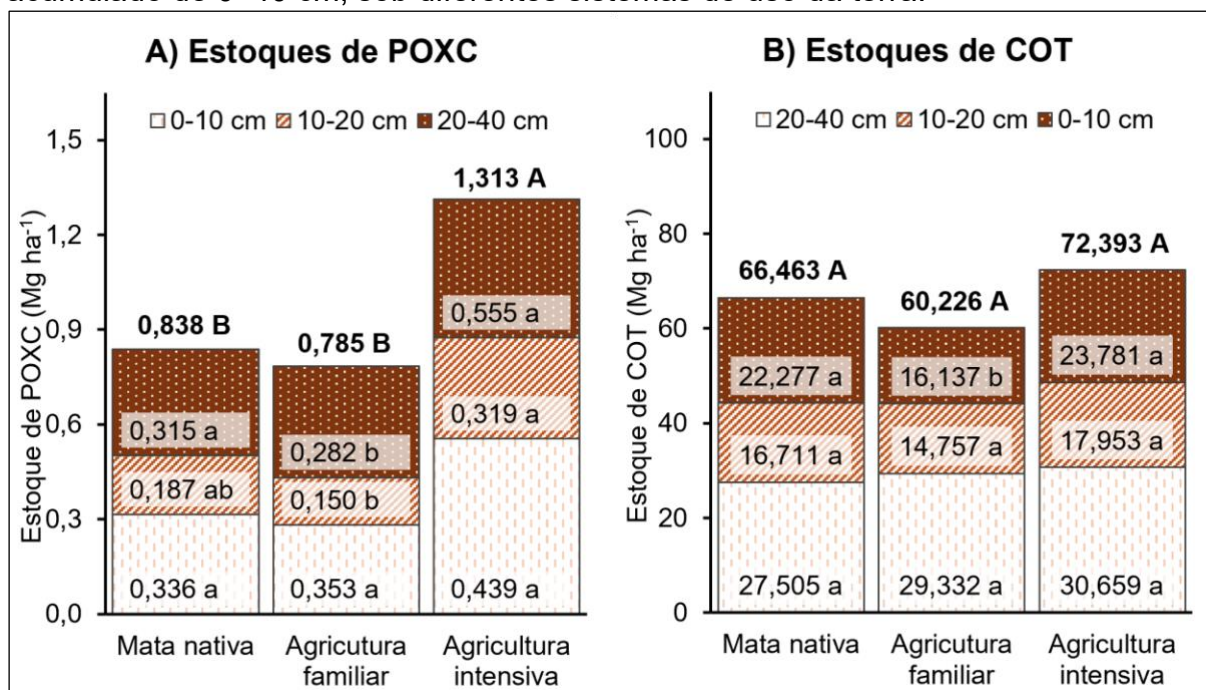
A análise dos estoques de POXC e COT por camada (Figura 4) permitiu comparar os sistemas de uso da terra de forma integrada, considerando os teores de carbono, a densidade do solo e a espessura das camadas, e uma avaliação mais representativa da dinâmica da matéria orgânica no perfil do solo (Ellert; Bettany, 1995). Para o POXC (Figura 4A), a resposta variou conforme a camada avaliada: na camada de 0–10 cm, a agricultura familiar apresentou menor estoque em relação à mata nativa e à agricultura intensiva; na camada de 10–20 cm, a agricultura intensiva foi superior à agricultura familiar, enquanto a mata nativa apresentou comportamento intermediário; já na camada de 20–40 cm, não houve diferença significativa entre os sistemas. Esses resultados sugerem que as alterações promovidas pelo uso da terra afetam principalmente o carbono lábil das camadas mais próximas à superfície, onde os efeitos do manejo sobre a dinâmica da matéria orgânica são mais intensos.

Figura 3 – Conteúdo de carbono orgânico total (COT) da amostra total de solo e associado aos macroagregados ($>250\ \mu\text{m}$), aos microagregados ($250\text{--}53\ \mu\text{m}$) e à fração silte+argila ($<53\ \mu\text{m}$), em diferentes profundidades e sistemas de uso da terra.



Os pontos representam as médias e as barras de erro indicam o erro padrão da média ($n = 6$); Médias seguidas de pelo menos uma letra minúscula em comum não difere entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância. Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

Figura 4 – Estoques de carbono oxidável por permanganato (POXC) e de carbono orgânico total (COT) nas profundidades de 0–10, 10–20 e 20–40 cm e no estoque acumulado de 0–40 cm, sob diferentes sistemas de uso da terra.



Médias seguidas pelo menos uma letra minúscula em comum, dentro de cada profundidade, ou por uma letra maiúscula em comum, no somatório do estoque de 0–40 cm, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

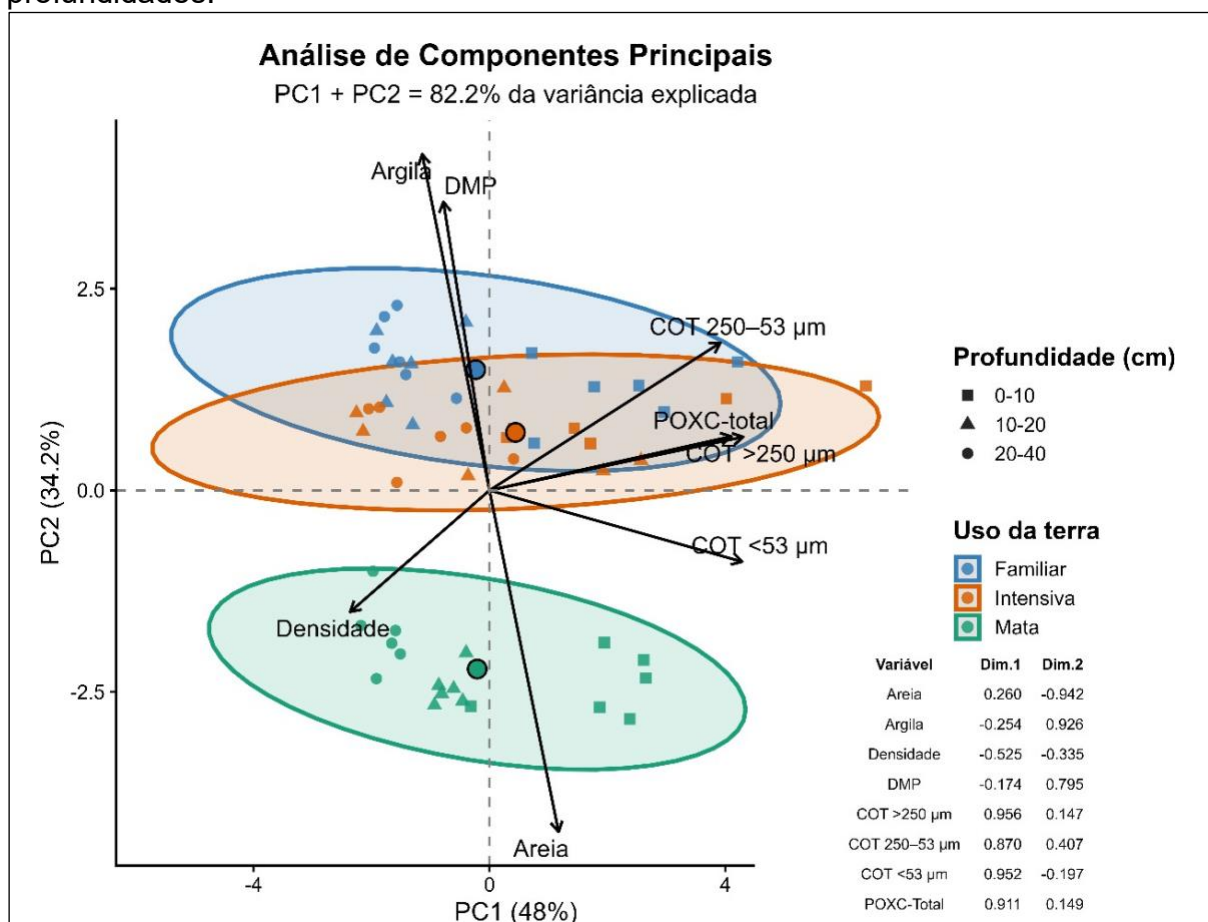
No perfil acumulado de 0–40 cm, a agricultura intensiva apresentou maior estoque de POXC, possivelmente em função do aporte contínuo de resíduos culturais da sucessão soja-milho e da contribuição da biomassa radicular. Para o COT, os estoques acumulados não diferiram entre os sistemas de uso da terra (Figura 4B), evidenciando menor sensibilidade dessa variável às alterações promovidas pelo manejo. Entre as camadas avaliadas, apenas a de 0–10 cm apresentou diferença significativa para COT, com menor estoque na agricultura familiar. Dessa forma, os resultados reforçam que o POXC foi mais sensível que o COT para detectar mudanças na qualidade da matéria orgânica do solo, por representar uma fração mais lábil e responsiva às alterações no manejo (Blair; Lefroy; Lisle, 1995).

Por outro lado, a ausência de diferenças significativas nas camadas de 10–20 cm e 20–40 cm indica menor influência do uso da terra sobre os estoques de carbono nessas profundidades. Esse padrão indica que os processos de aporte, redistribuição e estabilização da matéria orgânica ao longo do perfil do solo respondem de forma distinta aos sistemas de uso da terra, refletindo variações na entrada de resíduos e na sua incorporação às camadas subsuperficiais. Comportamento semelhante foi

observado por Totti *et al.* (2025), que destacaram a dependência da resposta dos estoques de carbono ao tipo de solo, à profundidade e ao histórico de uso. Em subsuperfície, a maior estabilização da matéria orgânica associada à fração mineral tende a reduzir a sensibilidade do carbono às práticas de manejo, promovendo a convergência dos estoques entre os sistemas avaliados (Lehmann; Kleber, 2015).

A Análise de Componentes Principais explicou 82,2% da variabilidade total dos dados, sendo 48,0% atribuídos ao primeiro componente e 34,2% ao segundo (Figura 5), indicando que os dois primeiros eixos foram suficientes para representar de forma consistente a estrutura multivariada dos atributos avaliados. A ordenação dos dados evidenciou uma clara separação entre os sistemas de uso da terra, refletindo gradientes ambientais e de manejo associados às propriedades físicas e aos compartimentos de carbono do solo.

Figura 5 – Biplot da análise de componentes principais (ACP) dos atributos físicos e dos compartimentos de carbono do solo em diferentes sistemas de uso da terra e profundidades.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

A Análise de Componentes Principais (ACP) explicou 82,2% da variabilidade total dos dados, sendo 48,0% atribuídos ao primeiro componente (CP1) e 34,2% ao segundo (CP2) (Figura 5). Esse elevado percentual de variância acumulada indica que os dois primeiros componentes representaram adequadamente a estrutura multivariada dos atributos avaliados. A ordenação das amostras no plano formado pelos componentes evidenciou uma clara separação entre os sistemas, indicando que as diferenças de manejo e as características intrínsecas de cada ambiente resultaram em padrões distintos de atributos físicos e de compartimentos de carbono do solo. Esse resultado demonstra a capacidade conjunta dessas variáveis em discriminar os sistemas avaliados, e evidencia a influência conjunta do uso da terra e das características edáficas sobre a dinâmica do carbono no solo.

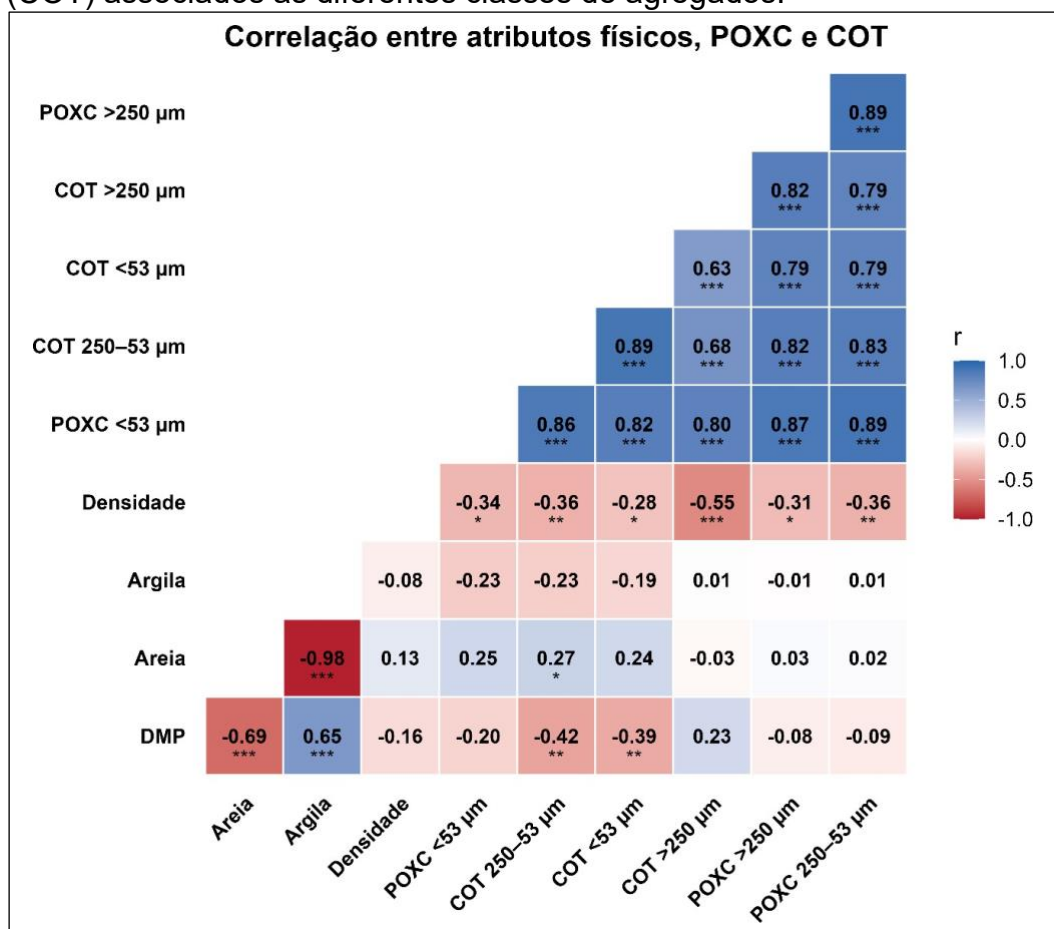
Nesse contexto, a mata nativa apresentou maior associação com atributos como maior proporção de areia e maior densidade do solo, sugerindo um comportamento mais influenciado pela condição natural do material de origem e menor interferência antrópica na organização estrutural do solo. Em contrapartida, os sistemas agrícolas se posicionaram em associação mais forte com maiores teores de argila e com os compartimentos de carbono avaliados, indicando que as alterações promovidas pelo uso da terra podem ter intensificado a exposição e redistribuição de frações finas, com reflexos diretos na dinâmica da matéria orgânica e na sua compartimentalização física. Esse padrão multivariado reforça que os indicadores de carbono não respondem de forma isolada às mudanças de uso do solo, mas estão intrinsecamente relacionados à reorganização dos atributos físicos, especialmente aqueles ligados à textura e à estrutura do solo. Assim, a interpretação dos compartimentos de carbono deve necessariamente considerar a interação entre atributos pedológicos e sistemas de manejo, uma vez que tais fatores atuam de forma conjunta na regulação dos processos de estabilização e proteção da matéria orgânica no solo (Wiesmeier *et al.*, 2019).

A matriz de correlação de Pearson (Figura 6) evidenciou associações positivas entre o POXC e o COT, indicando acoplamento entre os compartimentos lábeis e mais estabilizados da matéria orgânica do solo. As correlações mais elevadas observadas entre as frações de POXC reforçam a elevada sensibilidade desse indicador em detectar variações induzidas pelo uso e manejo do solo, sendo consistente com sua rápida resposta a mudanças na dinâmica do carbono. Por outro lado, as correlações negativas entre a densidade do solo e os compartimentos de

carbono indicam que maiores estoques de COT estão associados a melhores condições estruturais do solo. Esse padrão, observado em solo com alta proporção de areia sob área de mata nativa, no qual a maior densidade está relacionada ao material de origem e à menor microporosidade e conectividade dos poros, reforça a importância da estrutura do solo nos processos biológicos e físicos associados à ciclagem e estabilização do carbono (Hamza; Anderson, 2005).

As relações entre DMP, areia e argila reforçam o papel da textura na estabilidade dos agregados, uma vez que a distribuição granulométrica influencia a formação e a persistência de agregados estáveis. Porém, a ausência de correlação significativa entre o teor de argila e os compartimentos de carbono indica que a dinâmica da matéria orgânica depende da interação entre propriedades físicas, histórico de uso e manejo, que controlam os mecanismos de proteção e estabilização do carbono no solo (Lavallee, Soong; Cotrufo, 2020).

Figura 6 – Matriz de correlação de Pearson entre atributos físicos do solo e os conteúdos de carbono oxidável por permanganato (POXC) e carbono orgânico total (COT) associados às diferentes classes de agregados.



Fonte: Elaborado pela autora, 2026.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas de uso da terra influenciaram os compartimentos de carbono do solo, com diferenças entre mata nativa, agricultura familiar e agricultura intensiva. A agricultura intensiva apresentou maiores estoques de POXC ao longo do perfil de 0–40 cm, o que pode estar associado ao elevado aporte de resíduos culturais e biomassa radicular decorrente da sucessão soja–milho, favorecendo a renovação da fração lábil da matéria orgânica e atenuando os efeitos geralmente atribuídos à intensificação agrícola. Em contraste, a agricultura familiar apresentou os menores valores de POXC, refletindo menor aporte anual de resíduos, características do sistema agroflorestal e maior suscetibilidade à erosão superficial. A mata nativa apresentou comportamento intermediário, refletindo a influência de suas características pedológicas e da ausência de manejo agrícola.

Os estoques de COT não diferiram entre os sistemas de uso da terra, reforçando que as alterações promovidas pelo uso da terra são mais evidentes na fração lábil da matéria orgânica do solo. Parte da variabilidade observada também esteve associada às diferenças texturais entre os ambientes, com maior proporção de areia na mata nativa em relação às áreas agrícolas, o que pode ter influenciado a distribuição e a estabilização do carbono no solo. Entretanto, a agricultura familiar e a agricultura intensiva apresentaram solo com classe textural mais semelhantes, o que permitiu comparações mais diretas dos efeitos do manejo.

Dessa forma, os resultados mostram que o manejo e o uso da terra afetam a dinâmica do carbono no solo, principalmente a fração lábil da matéria orgânica, sendo o POXC um indicador mais eficiente e sensível para distinguir esses efeitos em comparação ao COT. No entanto, a interpretação desses resultados deve considerar conjuntamente as características físicas do solo, que controlam a distribuição, a proteção física e a estabilização do carbono.

5 REFERÊNCIAS

BANWART, S. A. *et al.* Soil functions: connecting earth's critical zone. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 47, p.333-359, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-063016-020544>. Acesso em: 18 jan. 2026.

BARRETO, A. C. *et al.* Características químicas e físicas de um solo sob floresta, sistema agroflorestal e pastagem no sul da Bahia. **Revista Caatinga**, v. 19, n. 4, p. 415-425, 2006. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/66>. Acesso em: 18 jan. 2026.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. *In*: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008.

BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 46, n. 7, p. 1459-1466, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/AR9951459>. Acesso em: 11 abr. 2026.

BLUM, W. E. H. Functions of soil for society and the environment. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 4, p. 75-79, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11157-005-2236-x>. Acesso em: 18 jan. 2026.

CARVALHO, R. L. S. *et al.* Comportamento das séries temporais de temperatura do ar, umidade e precipitação pluviométrica no município de Ariquemes (Rondônia-Brasil). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, n. 12, p. 123-142, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43228>. Acesso em: 18 jan. 2026.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 527-538, 1998. Disponível em: <https://www.scielo.br/r/rbcs/a/dXTDkRQqTBB3ZP5q8QnKXJS/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 07 mai. 2026.

CONFORTI, M. *et al.* Soil carbon stock in relation to soil properties and landscape position in a forest ecosystem of southern Italy (Calabria region). **Catena**, v. 144, p. 23-33, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2016.04.023>. Acesso em: 20 jan. 2026.

COSTA, F. S. *et al.* Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 527-535, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000300014>. Acesso em: 02 ago. 2023.

CULMAN, S. W. *et al.* Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 2, p. 494-504, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0286>. Acesso em: 01 fev. 2026.

CULMAN, S. W. *et al.* Short- and long-term labile soil carbon and nitrogen dynamics reflect management and predict corn agronomic performance. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 2, p. 493-502, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0382>. Acesso em: 01 fev. 2026.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/pdf/10.4141/cjss95-075>. Acesso em: 11 abr. 2026.

FOWLER, A. F. *et al.* A simple soil mass correction for a more accurate determination of soil carbon stock changes. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 2242, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-29289-2>. Acesso em: 05 mar. 2026.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>. Acesso em: 17 mai. 2026.

HURISSO, T. T. *et al.* Comparison of permanganate-oxidizable carbon and mineralizable carbon for assessment of organic matter stabilization and mineralization. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 5, p. 1352-1364, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.04.0106>. Acesso em: 08 abr. 2026.

JOBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. **Ecological Applications**, v. 10, n. 2, p. 423-436, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2). Acesso em: 08 maio 2026.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1986. p. 425-442. (Agronomy Monograph, n. 9). Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>. Acesso em: 8 mar. 2026.

LAL, R. Digging deeper: a holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. **Global Change Biology, Hoboken**, v. 24, n. 8, p. 3285-3301, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.14054>. Acesso em: 09 maio 2026.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v. 26, p. 261-273, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/gcb.14859>. Acesso em: 17 maio 2026.

LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, v. 528, n. 7580, p. 60-68, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature16069>. Acesso em: 10 maio 2026.

LORENZ, K.; LAL, R. **Carbon sequestration in agricultural ecosystems**. 1. ed. Cham: Springer International Publishing, 2018. XII, 392 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92318-5>. Acesso em: 8 maio 2026.

MACHADO, L. V. *et al.* Fertilidade e compartimentos da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Coffee Science**, v. 9, n. 3, p. 289-299, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/13895>. Acesso em: 16 mar. 2026.

POEPLAU, C. *et al.* Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone — carbon response functions as a model approach. **Global Change Biology**, v. 17, n. 7, p. 2415-2427, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x>. Acesso em: 08 maio 2026.

R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Version 4.4.1. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 8 maio 2026.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 5, p. 49-134, 2007. Disponível em: https://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Producao_Artigos/2007_Topicos.pdf. Acesso em: 12 jun. 2026.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. A. **Fracionamento físico do solo em estudos de matéria orgânica**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2002. 86 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/246248>. Acesso em: 16 mar. 2026.

SALOMÉ, C. *et al.* Carbon dynamics in topsoil and in subsoil may be controlled by different regulatory mechanisms. **Global Change Biology**, v. 16, n. 1, p. 416-426, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01884.x>. Acesso em: 20 mar. 2026.

SANTOS, H. G. *et al.* **O novo mapa de solos do Brasil**: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p. (Embrapa Solos. Documentos, 130). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/920267>. Acesso em: 04 ago. 2025.

SHANG, C.; TIESSEN, H. Organic matter lability in a tropical oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density, and magnetic fractionations. **Soil Science**, v. 162, n. 11, p. 795-807, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/00010694-199711000-00004>. Acesso em: 22 mar. 2026.

SILVA, C. A.; ANDERSON, S. J.; VALE, F. R. Carbono, nitrogênio e enxofre em frações granulométricas de dois Latossolos submetidos à calagem e adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 593-602, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000300012>. Acesso em: 23 mar. 2026.

SILVA, G. G.; OLIVEIRA, L. N. Análise da suscetibilidade e potencial à erosão laminar no município de São Miguel do Araguaia—GO. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2015. p. 6511-6518. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1412.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2026.

SIX, J. *et al.* Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, p. 155-176, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>. Acesso em: 25 mar. 2026.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, n. 14, p. 2099-2103, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00179-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00179-6). Acesso em: 09 abr. 2026.

STOCKMANN, U. *et al.* The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 164, p. 80-99, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>. Acesso em: 28 mar. 2026.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1085209>. Acesso em: 10 abr. 2026.

TOTTI, M. C. V. *et al.* Organic carbon stocks across various land use systems in Sandy Ulti-sols and Oxisols in Brazil. **Geoderma Regional**, v. 40, p. e00924, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2025.e00924>. Acesso em: 10 abr. 2026.

TELLES, E. C. C. *et al.* Influence of soil texture on carbon dynamics and storage potential in tropical forest soils of Amazonia. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 17, n. 2, p. 9.1-9.12, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2002GB001953>. Acesso em: 10 abr. 2026.

WANG, X. *et al.* Soil aggregation and the stabilization of organic carbon as affected by erosion and deposition. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 72, p. 55-65, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.01.018>. Acesso em: 12 mar. 2026.

WEIL, R. R. *et al.* Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. **American Journal of Alternative Agriculture**, v. 18, n. 1, p. 3-17, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1079/AJAA200228>. Acesso em: 11 abr. 2026.

WIESMEIER, M. *et al.* Soil organic carbon storage as a key function of soils – A review of drivers and indicators at various scales. **Geoderma**, v. 333, p. 149-162, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>. Acesso em: 20 maio 2026.

ZANATTA, J. A.; PULROLNIK, K.; VIANA, J. H. M. **Protocolo para avaliação do estoque de carbono e de nitrogênio do solo em sistemas florestais**: Projeto Saltus. Colombo: Embrapa Florestas, 2015. 33 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 277). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1023672> . Acesso em: 10 abr. 2026.