

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE EDUCAÇÃO, AGRICULTURA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

**IMPACTO DO USO E MANEJO DO SOLO NA DINÂMICA DO
CARBONO ORGÂNICO NO SUL DO AMAZONAS**

DAYANA BITENCOURT DE MOURA

Humaitá-AM
2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE EDUCAÇÃO, AGRICULTURA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

**IMPACTO DO USO E MANEJO DO SOLO NA DINÂMICA DO
CARBONO ORGÂNICO NO SUL DO AMAZONAS**

DAYANA BITENCOURT DE MOURA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, do instituto de Educação, Agricultura e Ambiente da Universidade Federal do Amazonas, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. DOUGLAS MARCELO PINHEIRO DA SILVA
Coorientador: Prof. Dr. BRUNO CAMPOS MANTOVANELLI

Humaitá-AM
2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

-
- M929i Moura, Dayana Bitencourt de
Impacto do Uso e Manejo do Solo na Dinâmica do Carbono Orgânico no Sul do
Amazonas / Dayana Bitencourt de Moura. - 2025.
79 f. : il., p&b. ; 31 cm.
- Orientador(a): Douglas Marcelo Pinheiro da Silva. Coorientador(a):
Bruno Campos Mantovanelli.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-
Graduação em Ciências Ambientais, Humaitá-AM, 2025.
1. Atributos físicos. 2. Calagem. 3. Matéria orgânica. 4. Sistemas
conservacionistas. I. Silva, Douglas Marcelo Pinheiro da. II. Mantovanelli, Bruno
Campos. III. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós- Graduação
em Ciências Ambientais. IV. Título
-

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE EDUCAÇÃO, AGRICULTURA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

FOLHA DE APROVAÇÃO

**IMPACTO DO USO E MANEJO DO SOLO NA DINÂMICA DO CARBONO
ORGÂNICO NO SUL DO AMAZONAS** (Linha de pesquisa 1: – Componentes e dinâmicas
dos ecossistemas com ênfase no bioma amazônico)

DAYANA BITENCOURT DE MOURA

Dissertação defendida e aprovada em 04 de julho de 2025, pela comissão julgadora:

Douglas M. P. da Silva

Profº. Dr. Douglas Marcelo Pinheiro da Silva
PPGCA-IEAA/UFAM - Orientador / Membro Titular Interno

Documento assinado digitalmente
gov.br JULIANE KAYSE ALBUQUERQUE DA SILVA QUER
Data: 28/07/2025 15:40:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profª. Drª. Juliane Kayse Albuquerque da Silva Querino
PPGCA-IEAA/UFAM - Membro Interno

Documento assinado digitalmente
gov.br VAIRTON RADMANN
Data: 25/07/2025 12:48:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profº. Dr. Vairton Radmann
IEAA/UFAM - Membro Externo

DEDICATÓRIA

À Deus pelo dom da vida; à minha mãe e irmãos que sempre estiveram comigo e são a base da minha vida; a todos aqueles que me incentivaram e colaboraram diretamente comigo, tornando possível a conclusão desta etapa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida e por sempre me iluminar com grandes oportunidades e me permitir concluir essa primeira etapa da minha Pós-graduação;

Agradeço a minha família, por sempre se fazer presente na minha vida e me apoiar nos meus sonhos, em especial a minha mãe, Antônia Dantas Bitencourt, meus irmãos Alicia, Diênata, Ruan e Anadria, e minhas sobrinhas Maria Rita e Izabele;

Agradeço ao meu orientador, Professor Drº. Douglas Marcelo Pinheiro da Silva, pelas orientações, incentivos e apoio, me proporcionando ensinamentos e não medindo esforços para realização desse trabalho;

Agradeço ao meu Coorientador, professor Drº Bruno Campos Mantovanelli, pelas orientações e dedicação sempre que precisei, quem me auxiliou no projeto, contribuindo sempre para realização do trabalho;

Agradeço ao professor Drº Renato Francisco da Silva Souza pelas contribuições e por todo apoio, orientação e dedicação;

Agradeço aos meus colegas Mailson Nascimento e Charle Cunha pela contribuição na execução do projeto e todos aqueles que contribuíram para a realização das coletas e nas análises das amostras;

Agradeço ao Me. Alan Ferreira Leite de Lima por suas contribuições nas análises e orientação no projeto;

Agradeço as minhas amigas, Rizoneide Faustino e Miquele Araújo que estão caminhando essa trajetória comigo, grata pelo companheirismo e lealdade e todo apoio na execução das análises, e agradeço também a Priscila Cruz e aos demais colegas que me ajudam, os quais tive o privilégio de conhecer durante esse período;

Agradeço ao IEAA/UFAM pela oportunidade de fazer esse curso de Pós-Graduação e por todo o corpo docente pelos ensinamentos nas disciplinas ministradas;

Agradeço a FAPEAM pela concessão da bolsa durante esses períodos de realização do projeto de pesquisa;

À todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, obrigada a todos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE ABREVIACÕES E/OU SÍMBOLOS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA.....	13
1.2 HIPÓTESE.....	14
1.3 OBJETIVOS	14
1.3.1 Geral	14
1.3.2 Objetivos Específicos.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 CICLO DO CARBONO.....	15
2.2 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO	17
2.3 DINÂMICA DO CARBONO EM SOLOS AMAZÔNICOS	19
2.4 FRACIONAMENTO DA MATÉRIA ORGÂNICA	20
2.5 ATRIBUTOS DO SOLO QUE INFLUENCIAM NOS TEORES DE MATÉRIA ORGÂNICA	22
3 METODOLOGIA	24
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL	24
3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	26
3.3 METODOLOGIA DE CAMPO	28
3.4 ANÁLISES DE LABORATÓRIO.....	29
3.4.1 Agregado do solo	30
3.4.2 Granulometria	33
3.4.3 Análise Físico-hídrico.....	34
3.4.4 Carbono orgânico total	35
3.4.5 Fracionamento da matéria orgânica.....	36
3.4.6 Taxa de Decomposição (K) e Tempo de Meia-vida (T ^{1/2}) da Palhada.....	40
3.4.7 Análise estatística	41
4 RESULTADOS.....	41
4.1 Físico-hídricos.....	41
4.2 Agregados.....	46
4.3 Carbono Orgânico Total.....	51
4.4 Fracionamento da matéria orgânica.....	54

4.5 Decomposição da Brachiaria e T^{1/2} do Carbono	60
5 DISCUSSÃO	61
6 CONCLUSÃO	68
7 REFERÊNCIAS	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo do carbono.....	15
Figura 2: Mapa de localização da Fazenda Experimental Mangabeira do IEAA/UFAM, Campus de Humaitá-AM	24
Figura 3: Croqui da área experimental na fazenda mangabeira do IEAA/UFAM (adaptado de Mantovanelli, 2023).	26
Figura 4: Área do delineamento experimental na Fazenda mangabeira do IEAA/UFAM.	27
Figura 5: Implantação da Brachiaria Marandu e formação da cobertura do solo na área experimental.	27
Figura 6: Coleta pós-cultivo do arroz na área experimental.	28
Figura 7: Mini trincheiras para coleta das amostras deformadas e indeformadas de solos.....	29
Figura 8: Destorramento e pesagem dos agregados do solo.	30
Figura 9: Umedecimentos e agitação dos agregados do solo em sistema Yoder.....	31
Figura 10: Secagem das amostras de agregados do solo.....	32
Figura 11: Análise granulométrica do solo.	33
Figura 12: Análises físicas do solo pelo método do anel volumétrico em mesa de tensão.	35
Figura 13: Agitação das amostras de solo para o fracionamento físico.	36
Figura 14: Fracionamento da matéria orgânica particulada.	37
Figura 15: Pesagem das amostras após maceração.	38
Figura 16: Análise do carbono orgânico.	39
Figura 17: Valores de médias de fracionamento da matéria orgânica em função de preparamos de solo e doses de calcário em três momentos na profundidade de 0-20 cm. Humaitá, AM. 2025.	55
Figura 18: Valores de médias de fracionamento da matéria orgânica em função de preparamos de solo e doses de calcário em três momentos na profundidade de 20-40 cm. Humaitá, AM. 2025.	57
Figura 19: Valores de médias de fracionamento de matéria orgânica em função de preparamos de solo e doses de calcário em três momentos na profundidade de 40-60 cm. Humaitá, AM. 2025.	59
Figura 20: Taxa de decomposição de Brachiaria avaliadas a cada 10 dias no município de Humaitá, AM.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização física e química do solo da área experimental, nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.....	25
Tabela 2: Valores de médias de atributos físico-hídrico em função de preparo de solo e doses de calcário e três momentos na profundidade de 0-20 cm. Humaitá, AM. 2025.....	43
Tabela 3: Valores de médias de atributos físico-hídrico em função de preparo de solo e doses de calcário e três momentos na profundidade de 20-40 cm. Humaitá, AM. 2025.....	44
Tabela 4: Valores de médias de estabilidade de agregados em função de preparo de solo e doses de calcário e três momentos na profundidade de 0-20 cm. Humaitá, AM. 2025.....	47
Tabela 5: Valores de médias de estabilidade de agregados em função de preparo de solo e doses de calcário em três momentos na profundidade de 20-40 cm. Humaitá, AM. 2025.....	50
Tabela 6: Valores de médias de carbono orgânico em função de preparos de solo e doses de calcário em três momentos na profundidade de 0-20 e 20-40 cm. Humaitá, AM. 2025.....	52
Tabela 7: Valores de médias de Carbono orgânico em função de preparos de solo e doses de calcário em três momentos na profundidade de 40-60 cm. Humaitá, AM. 2025.....	53

LISTA DE ABREVIASÕES E/OU SÍMBOLOS

IPCC - Painel Intergovernamental para a Mudança de Clima

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

C – Carbono

CO – Carbono orgânico

DBC - delineamento em blocos casualizados

Ca – Cálcio

Al – Alumínio

Mg – Magnésio

CO₂ – Dióxido de carbono

COS – Carbono orgânico do solo

MO – Matéria orgânica

MOS - Matéria orgânica do solo

SPC – sistema de plantio convencional

SPD – sistema de plantio direto

pH - potencial Hidrogeniônico

N – Nitrogênio

N₂O - Óxido nitroso

CH₄ – metano

COT - carbono orgânico total

KCl – Cloreto de potássio

Pg – Pentagrama

Gt – gigatonelada

ECOS - Estoque de carbono orgânico no solo

IMC - Índice de manejo de carbono

RP – Resistencia do solo a penetração

DS – Densidade do solo

RESUMO

MOURA, D. B. Impacto do uso e manejo do solo na dinâmica do carbono orgânico no sul do amazonas. 2025, 79f. Dissertação (mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de educação, Agricultura e Ambiente, Universidade Federal do Amazonas.

O solo é o maior reservatório terrestre de carbono e desempenha papel fundamental na regulação climática global. Sua atuação como sumidouro ou fonte de carbono depende do manejo adotado, já que a matéria orgânica do solo é a principal responsável pelo sequestro de CO₂ atmosférico. Diante disso, objetivou-se avaliar os impactos de manejo do solo na dinâmica do carbono da matéria orgânica no solo. O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Mangabeira (IEAA/UFAM), em blocos casualizados com arranjo em parcelas subdivididas, em esquema fatorial 3x4, envolvendo três sistemas de manejo (plantio direto, escarificação e preparo convencional) e quatro doses de calcário (0, 2, 4 e 6 t ha⁻¹). Amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, em três momentos distintos ao longo de dois cultivos (arroz e milho). As análises físico-químicas seguiram os métodos do manual de análises de solos da Embrapa (2017), e os dados foram submetidos à análise de variância (teste F) a 5% de significância e comparadas pelo teste de Tukey, também ao nível de 5% de probabilidade. Os resultados indicaram densidade do solo variando entre 1,30 a 1,70 Mg m⁻³, com menores valores no plantio direto. O diâmetro médio ponderado de agregados (DMP) foi superior nos sistemas conservacionistas, alcançando 6,47 mm na escarificação e 6,44 mm no plantio direto com 6 t ha⁻¹ de calcário. O teor de carbono orgânico total (COT) aumentou de 4,28 g kg⁻¹ (M1) para 10,85 g kg⁻¹ (M3) em áreas sem calagem. Conclui-se que o plantio direto e a escarificação, associados à calagem adequada, promovem melhorias na estrutura do solo e no acúmulo de carbono orgânico, com efeitos positivos sobre a qualidade do solo e a sustentabilidade da produção agrícola na região. Esses resultados contribuem com o avanço de práticas conservacionistas e podem subsidiar políticas e recomendações técnicas voltadas ao desenvolvimento sustentável da agricultura no sul do Amazonas.

Palavras-chave: Atributos físicos, Calagem, Matéria orgânica, Sistemas conservacionistas

ABSTRACT

MOURA, D. B. Impact of soil use and management on organic carbon dynamics in southern Amazonas. 2025, 79f. Dissertation (master's degree in environmental Sciences) – Institute of Education, Agriculture and Environment, Federal University of Amazonas.

Soil is the largest terrestrial carbon reservoir and plays a fundamental role in global climate regulation. Its role as a carbon sink or source depends on the management adopted, since soil organic matter is primarily responsible for atmospheric CO₂ sequestration. Therefore, the objective of this study was to evaluate the impacts of soil management on the dynamics of soil organic matter carbon. The experiment was conducted at the Mangabeira Experimental Farm (IEAA/UFAM), in randomized blocks with a split-plot arrangement, in a 3x4 factorial scheme, involving three management systems (no-tillage, scarification and conventional tillage) and four lime rates (0, 2, 4 and 6 t ha⁻¹). Soil samples were collected from the 0-20, 20-40 and 40-60 cm layers, at three different times during two crops (rice and corn). The physicochemical analyses followed the methods of the Embrapa soil analysis manual (2017), and the data were subjected to analysis of variance (F test) at 5% significance and compared by the Tukey test, also at the 5% probability level. The results indicated soil density ranging from 1.30 to 1.70 Mg m⁻³, with lower values in no-tillage. The weighted mean aggregate diameter (WMD) was higher in conservation systems, reaching 6.47 mm in scarification and 6.44 mm in no-tillage with 6 t ha⁻¹ of limestone. The total organic carbon (TOC) content increased from 4.28 g kg⁻¹ (M1) to 10.85 g kg⁻¹ (M3) in areas without liming. It is concluded that direct planting and scarification, associated with adequate liming, promote improvements in soil structure and organic carbon accumulation, with positive effects on soil quality and the sustainability of agricultural production in the region. These results contribute to the advancement of conservation practices and can support policies and technical recommendations aimed at the sustainable development of agriculture in southern Amazonas.

Keywords: Physical attributes, Liming, Organic matter, Conservation systems

1 INTRODUÇÃO

O carbono (C) na forma de dióxido de carbono, conhecido como gás carbônico (CO₂), entra na biomassa terrestre através da fotossíntese (produtividade bruta primária), e uma parte dessa quantidade é imediatamente liberada como CO₂ pela respiração das plantas (Ferreira, 2013). Esse C é armazenado na biomassa vegetal (produtividade líquida primária) e entra na atmosfera por senescênci a ou exsudação, simultaneamente, o fogo e a respiração heterotrófica devolvem à atmosfera uma quantidade equivalente à produção de líquido primário, encerrando seu ciclo (IPCC, 2006).

A quantidade de carbono no solo é quase o dobro da atmosfera, sendo o maior reservatório do ciclo global de carbono e desempenhando um papel crucial na regulação climática (Gong et al., 2021). Assim, o equilíbrio entre a entrada e a saída de carbono orgânico do solo (COS) tem um impacto crítico na concentração atmosférica de CO₂, e as atividades humanas que têm maior influência neste equilíbrio são as mudanças no uso da terra (Primieri et al., 2017).

Devido à sua presença proeminente no meio ambiente e seus constituintes, em relevância o carbono, a matéria orgânica evoluiu para o principal método de obtenção de energia e nutrientes para a atividade microbiológica por meio da respiração (Secretti, 2017). A quantidade e a qualidade da matéria orgânica no solo favorecem a sobrevivência e proliferação de microrganismos benéficos por conta própria (Lourente et al., 2010; Maia et al., 2015).

Certamente a matéria orgânica do solo é uma dinâmica complicada que depende primordialmente da produção de plantas, de resíduos e da decomposição, envolvendo também microrganismos e processos bioquímicos que mudam no tempo e no espaço dependendo dos fatores bióticos e abióticos, do uso de fertilizantes e do grau de associação com componentes inorgânicos do solo (Schnitzer & Monreal, 2011).

Aproximadamente 80-90% do carbono na matéria orgânica é composto de substâncias não microscópicas, algumas das quais representam até 30% do carbono, como os ácidos cítrico, ftálico e malônico, que são ácidos orgânicos com baixo teor de carbono e peso molecular, bem como substâncias microscópicas como ácidos húmicos, fúlvicos e huminas (Secretti, 2017).

A matéria orgânica (MO) por ser determinante nas qualidades físicas, químicas e biológicas do solo, visa avaliar o método de manejo utilizado nas culturas, pois afeta sua entrada e qualidade, e os métodos tradicionais de cultivo reduzem a proteção física do MOS, expondo-a a fatores de degradação, resultando na diminuição do C e apresentando processos erosivos (Assunção et al., 2019).

As práticas de manejo agrícola, tais como: rotação de culturas, preparo do solo e fertilização, modificam as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo tanto no curto quanto no longo prazo. Portanto, eles têm um impacto direto no desenvolvimento e produtividade das culturas, bem como na sustentabilidade da agricultura (Zubeldia et al., 2018).

Em geral, em sistemas de plantio convencional (SPC), a perturbação do solo tende a estimular as perdas de carbono, tanto por aumentar a oferta de oxigênio para os organismos decompositores, como por fragmentar agregados que protegem o C do acesso microbiano; já no manejo conservacionista, no qual não há agitação prévia à semeadura (plantio direto; sistema plantio direto), frequentemente resulta em ganhos de carbono (Ferreira 2013).

O tipo de sistema de produção deve ser levado em consideração ao aumento da quantidade de matéria orgânica no solo. Em uma avaliação de um experimento conduzido ao longo de 21 anos com sistemas convencionais, para examinar os efeitos do crescimento direto das plantas, encontraram valores 15% menores na adição de carbono quando comparados aos sistemas de plantio direto (Costa et al., 2004).

Portanto, é crucial compreender o impacto das mudanças no uso da terra e no armazenamento de carbono como indicadores precoces de mudanças na qualidade do solo devido às práticas de gestão (Crespo et al., 2023).

1.1 JUSTIFICATIVA

O solo é o maior reservatório terrestre de carbono orgânico, sendo essencial para a regulação do clima global. Sua dinâmica é fortemente influenciada por fatores como uso e manejo do solo, temperatura, umidade e atividade biológica. Dependendo do manejo adotado, o solo pode atuar como sumidouro ou como fonte de carbono, e a presença de matéria orgânica é determinante para o sequestro de CO₂ da atmosfera.

A conversão de áreas nativas em sistemas agrícolas e o uso intensivo do solo aceleram a decomposição da matéria orgânica, comprometem a estrutura do solo e reduzem os estoques de carbono. Em contraponto aos sistemas intensivos, práticas conservacionistas como o plantio direto, a escarificação e a calagem, favorecem a formação e a estabilidade de agregados, aumentam a proteção física da matéria orgânica e estimulam a atividade biológica, contribuindo para a manutenção ou incremento do carbono orgânico no solo.

Diante da expansão agrícola no sul do Amazonas, torna-se essencial compreender os efeitos dos diferentes manejos sobre a dinâmica do carbono e os atributos do solo. Isso possibilita a definição de estratégias que aliem produtividade agrícola à conservação dos recursos naturais. Além disso, o monitoramento de sistemas de manejo permite avaliar, mesmo em curto prazo, os impactos sobre os atributos físicos e químicos do solo, orientando a recuperação de áreas degradadas e a adoção de manejos mais eficientes e sustentáveis.

O presente estudo contribui diretamente para o ODS 2 (fome zero e agricultura sustentável) e, de forma integrada, fortalece os ODS 8 (trabalho decente e crescimento econômico), 9 (indústria, inovação e infraestrutura), 12 (consumo e produção responsáveis), 13 (ação contra a mudança global do clima) e 15 (vida terrestre), promovendo a articulação entre produção agrícola, conservação ambiental e desenvolvimento regional sustentável.

1.2 HIPÓTESE

Os sistemas de manejo do solo associado a rotação e sucessão de culturas e calagem altera a dinâmica da matéria orgânica, pois afeta o condicionamento físico (agregação do solo) e biológico (taxa de decomposição) do solo.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

Avaliar os impactos de manejo na dinâmica do carbono da matéria orgânica no solo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar os impactos dos diferentes usos e manejos de solos sobre os reservatórios e taxa de decomposição da matéria orgânica;
- Avaliar os atributos físicos e químicos em diferentes sistemas de uso e manejo do solo;

- Estabelecer estratégias de manejo conservacionistas de solos, visando a manutenção e/ou melhoria dos atributos físicos e químicos do solo, por meio de práticas que melhor se adequa às condições amazônicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CICLO DO CARBONO

O carbono é o elemento químico essencial para existência da vida na terra, e está presente em todos os organismos vivos, podendo ser encontrado em locais variados (White, 2023). O acréscimo na quantidade de gases de efeito estufa presentes na atmosfera despertou interesse para o carbono orgânico do solo (COS), já que os solos representam a maior reserva de carbono entre todos os ecossistemas terrestres (Lense et al., 2021).

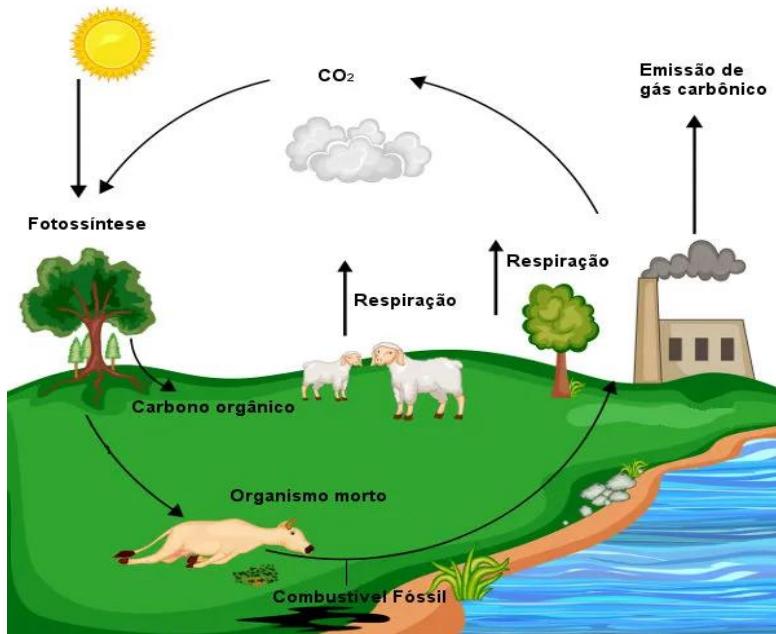


Figura 1: Ciclo do carbono.

Fonte: Santos (2013)

A captura de carbono em sua apresentação orgânica revela que a fotossíntese é o sustento fundamental da vida no planeta Terra, a luz solar é transformada em energia química e armazenada nas moléculas de glicose, posteriormente, a energia contida nessas moléculas é liberada durante a respiração, processo oposto à fotossíntese, onde, através desse processo

de fotossíntese e respiração celular, o carbono se transforma de sua forma inorgânica para orgânica e retorna novamente para a forma inorgânica, fechando seu ciclo (Pereira, 2013).

O armazenamento de carbono no solo, além de ajudar na redução dos gases de efeito estufa, também traz diversos benefícios para a saúde do solo, como a reciclagem de nutrientes, aumento da atividade biológica, melhorias nas propriedades físicas, retenção de água, entre outros (Rangel et al., 2008; Campanha et al., 2009).

Levando em consideração exclusivamente as seções terrestres (solo, atmosfera e biota), a terra detém a maior reserva de carbono disponível, especialmente ao perceber que dos 2.500 Gt disponíveis no solo, cerca de 1.550 Gt são compostos pelo carbono orgânico (CO), armazenado na forma de matéria orgânica (Lal, 2004). Aproximadamente 80% do carbono é retido a uma profundidade de 1 metro, o que torna o carbono orgânico do solo um elemento essencial nas reservas mundiais de carbono (Da Luz Silva et al., 2023).

A transformação do uso do solo provocada pela intervenção humana altera a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) e, por conseguinte, dos depósitos de carbono (C) e nitrogênio (N), ao transformar áreas naturais em sistemas agrícolas (Costa et al., 2020). A liberação de CO₂ do solo é o principal fator do ciclo do carbono na biosfera, chegando a representar aproximadamente 75% da respiração do ecossistema, e isso ressalta a importância significativa desse componente em relação à sua função como emissor ou absorvedor de carbono atmosférico (Araújo, 2023).

A quantidade de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera global tem variado entre 278 e 391 ppm, óxido nitroso (N₂O) entre 2,5 e 1.803 ppb, metano (CH₄) entre 270 e 342 ppb, e os gases fluorados têm apresentado um aumento constante desde os tempos antes da Revolução Industrial e desempenham um papel significativo no aquecimento global, de acordo com o Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014).

As características provenientes do clima, da geologia e das práticas de utilização e gestão em diferentes tipos de solo e vegetação têm sido reconhecidas como os principais elementos que influenciam no armazenamento inicial de carbono no ecossistema terrestre. (Siefert & Dos Santos, 2018). Técnicas corretas de cuidado, que têm como objetivo conservar ou até aumentar a quantidade de carbono no sistema solo-planta, podem ajudar a reduzir os impactos do aquecimento global, contribuindo para o aumento do estoque de carbono no

solo, possibilitando a recuperação dos níveis de matéria orgânica do solo para valores semelhantes aos originais (Costa, 2015).

Ao adquirir mais conhecimento sobre a conexão entre a administração da terra e o ciclo do carbono, é viável estabelecer estratégias de controle que ampliem a entrada de carbono no solo e reduzam a saída desse elemento, o que se revela um método coerente e eficaz para garantir tanto a eficiência das plantações de alimentos por meio da melhoria da qualidade do solo, quanto a redução do impacto do aquecimento global e das mudanças climáticas por meio do sequestro do carbono da atmosfera (Dieckow et al., 2004).

2.2 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

A matéria orgânica do solo (MOS) é conhecida como qualquer substância orgânica, proveniente de plantas ou animais, como folhas caídas, restos de resíduos parcialmente decompostos, a biomassa microbiana, os compostos orgânicos dissolúveis e a substância orgânica fixada no solo (Do Amaral, 2023). Uma parte importante do carbono penetra no solo através do processo de fotossíntese, dando origem ao material vegetal que é decomposto pelos organismos presentes no solo e, por fim, adquire características que o tornam duradouro, seja através da interação com íons minerais ou da criação de moléculas orgânicas resistentes (Urquiaga et al., 2010).

Calcula-se que a reserva total de carbono presente no solo ao redor do mundo seja de cerca de 2.500 Gt, sendo que 70% correspondem ao carbono orgânico e os outros 30% são compostos de carbono inorgânico (Liu et al., 2020). A análise da quantidade de matéria orgânica presente no solo possibilita não apenas a avaliação da fertilidade dessa terra, mas também de sua capacidade de sequestro de carbono (Gonçalves et al., 2022).

A matéria orgânica presente no solo é um fator adicional que pode refletir em sua excelência, uma vez que auxilia de maneira favorável para o crescimento e desenvolvimento das plantas, influenciando nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Francine et al., 2016). A decomposição do material orgânico no solo pode ser acelerada por práticas de manejo inadequadas, mas é sabido que o aumento do estoque de carbono é um processo gradual e complexo, exigindo práticas conservacionistas, especialmente em áreas de clima tropical, onde a decomposição é mais intensa devido ao calor e à umidade elevados do solo (Oliveira et al., 2020).

O acúmulo de carbono no solo pode ser alcançado através da recuperação de solos degradados por meio de práticas de manejo conservacionista, como a preservação da matéria orgânica, a rotação de culturas com culturas de cobertura, a gestão integrada de nutrientes, a eficiência no uso da água e na absorção de nutrientes, o manejo adequado de pastagens com inclusão de espécies arbóreas, o monitoramento do pastejo dos animais e a utilização equilibrada dos insumos de produção (Silva et al, 2023).

A dispersão da matéria orgânica no solo varia entre os sistemas de plantio direto e convencional, visto que no plantio direto ela concentra-se na superfície do solo, enquanto no convencional é distribuída por toda a camada arável, o que acelera a sua decomposição (Vieira et al, 2007). Como resultado, o material orgânico do solo é considerado um indicador significativo da qualidade do solo e é muito sensível a mudanças nos sistemas de manejo (Rosa et al., 2011).

Técnicas de fracionamento físico permitem a identificação de mecanismos de estabilização de MO em vários solos, além do estudo no papel das frações transitórias de MO na qualidade do solo e do ambiente, o que pode contribuir significativamente para nossa compreensão do acúmulo de MO em solos individuais sob sistemas de gerenciamento conservadores (Nascimento et al., 2009).

A qualidade do solo está diretamente relacionada com a matéria orgânica existente, que é definida como a capacidade deste, atuar exclusivamente dentro dos limites de um ecossistema natural, mantendo ou melhorando a qualidade ambiental e promovendo a saúde de plantas e animais (Salton et al., 2005). Os resíduos orgânicos são importantes para a saúde do solo, pois a ação dos micro-organismos ajuda a aumentar a capacidade de infiltração de água, diminuindo a erosão e promovendo a estabilidade dos agregados, porosidade e densidade do solo (Souza, 2019).

A taxa de perda de matéria orgânica (k_2) é significativamente influenciada pela rotação do solo, que promove a atividade de microrganismos decompositores (Lovato et al., 2004). Comparado a um sistema de manejo sem rotação, esta pode dobrar o valor de k_2 em um único solo (Bayer et al., 2000b). Devido a uma diminuição na velocidade de decomposição, existe a possibilidade de acúmulo de matéria orgânica nos solos utilizados no plantio direto, e de acordo com um estudo, as taxas de acúmulo de carbono orgânico total

(COT) no plantio direto no Brasil variam de 0,04 a 1,33 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, que foram observadas em comparação com os níveis convencionais de COT (Bayer, 2003a).

Segundo Oliveira et al. (2010), a calagem emergiu como a prática agrícola mais utilizada para adequar as propriedades químicas do solo às necessidades de diferentes culturas. Dessa forma, com a calagem, o pH do solo é elevado, o Al³⁺ tóxico é neutralizado e Ca²⁺ e Mg²⁺ são adicionados ao solo, criando condições favoráveis para o crescimento do sistema radicular e absorção de nutrientes e água pelas plantas (Zandoná et al., 2015).

É primordial zelar pela conservação e aprimoramento da fertilidade do solo, visto que isso se reflete na viabilidade de práticas agrícolas sustentáveis, contribuindo para orientar os pequenos produtores na adoção de modelos de produção ecologicamente corretos (Lambais et al., 2021).

2.3 DINÂMICA DO CARBONO EM SOLOS AMAZÔNICOS

Por conta de sua vasta extensão territorial e da interação com as condições climáticas e de relevo, a Amazônia apresenta uma grande variedade de tipos de solos, o que resulta em diversos níveis de capacidade de absorção de carbono (EMBRAPA, 1999). Analisar e mensurar a quantidade de carbono nos distintos compartimentos (solo, planta e atmosfera) contribui para a precisão das projeções do equilíbrio de carbono em escalas regional e global (Novaes Filho et al., 2007).

A Floresta Amazônica tem sido alvo de grande interesse devido às suas reservas de carbono armazenadas em seus ecossistemas, o que pode contribuir para o aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera (Nobre, 2002). Isso gera preocupações a nível global sobre as condições de vida no futuro, incentivando estudos em diversas áreas para prever os níveis de carbono em diferentes setores, assim como sua possível liberação para a atmosfera (Marques et al., 2013). Uma vez que, as mudanças no uso da terra são as atividades humanas que mais geram impacto no equilíbrio de entrada e saída de carbono no solo, onde essas perdas de C podem variar de 25 a 75%, dependendo do uso anterior da terra, manejo e das condições climáticas (Primieri et al., 2017).

Um levantamento realizado por Quesada et al (2010) analisou as taxas de deterioração de carbono em distintas profundidades do solo na região Amazônica, revelando que a perda de carbono se mostrou mais acentuada nas camadas mais superficiais do solo (0-10 cm), com índices de perda variando de 0,3% a 1,2% ao ano, dependendo da forma de utilização da

terra. A última estimativa do estoque de carbono orgânico no solo (ECOS) para o país indicou uma concentração de 71,3 Pg C no solo em até 1 metro de profundidade, enquanto os ecossistemas apresentam variações por unidade de área em cada bioma do Brasil (Tosto et al., 2023). No bioma Amazônia, esse número é superior à soma de todos os outros biomas, com os solos mais profundos, como Latossolos e Argissolos, apresentando valores de 24,01 Pg C e 17,73 Pg C, respectivamente, sendo responsáveis por mais de 57% dos ecossistemas do país (Gomes et al., 2019).

As mudanças no uso da terra, particularmente a conversão de florestas em agricultura, resultam na liberação de C da vegetação e do solo para a atmosfera, e este cenário tem despertado o interesse da comunidade científica em realizar pesquisas para mitigar os efeitos negativos das atividades antrópicas e desenvolver estratégias sustentáveis de uso e manejo dos recursos naturais (Silva, 2007).

Pesquisas históricas comprovam a influência da matéria orgânica na manutenção da estrutura do solo, características físico-químicas e saúde do solo (Siefert, 2018). Os agregados formam a base do solo e desempenham um papel crucial na preservação de sua porosidade, garantindo assim a circulação de ar, favorecendo o desenvolvimento das plantas e microrganismos, facilitando a penetração da água e evitando a erosão do solo (Nobre, 2015). Devido ao seu papel crucial na formação dos agregados no solo, a glomalina participa de processos que favorecem a aeração, drenagem e atividade microbiana no solo, além disso, ela ajuda a reduzir significativamente a decomposição da matéria orgânica, protegendo os compostos vulneráveis dentro dos agregados, o que auxilia no armazenamento de carbono no solo (Lambais et al., 2021).

A composição da Matéria orgânica do solo (MOS) é altamente diversificada, com fragmentos ativos ou lábeis se decompondo em poucos meses e fragmentos mais resistentes ou não lábeis permanecendo na superfície do solo por muitos anos (Aguiar et al., 2013). Pesquisas envolvendo a dinâmica da matéria orgânica ainda são incipientes na região Sul do Amazonas, embora essa região venha sofrendo fortes mudanças no uso da terra nas últimas décadas.

2.4 FRACIONAMENTO DA MATÉRIA ORGÂNICA

Tão crucial quanto a medição dos níveis gerais de carbono, a análise do carbono presente nas diferentes frações da Matéria Orgânica do Solo (MOS) pode revelar dados

significativos sobre a saúde do solo e os efeitos das práticas de manejo adotadas (Nanzer et al., 2019). Os fracionamentos físico e químico dos componentes orgânicos do solo é essencial para analisar as alterações resultantes da exploração da terra (Bayer et al., 2004).

De maneira geral, as frações humificadas são divididas em três grupos: as substâncias huminas (H), que correspondem à matéria orgânica associada fortemente à parte mineral do solo, sendo insolúveis; os ácidos fúlvicos (AF), que contêm uma quantidade significativa de grupos funcionais oxigenados e são solúveis tanto em meio ácido quanto básico; e os ácidos húmicos (AH), que não são solúveis em meio muito ácido, uma vez que a protonação dos grupos funcionais pode resultar na desestruturação e flocação das macromoléculas (Clemente et al., 2018).

O processo de fracionamento físico é mais apropriado do que os procedimentos químicos para realizar a análise qualitativa da MOS, uma vez que está diretamente ligado à composição do solo, resultando em frações que estão intimamente ligadas à estrutura e à função da matéria orgânica (Bayer et al., 2003b). Em áreas com boa circulação de ar, a implementação de práticas conservacionistas gera mudanças na troca de carbono entre o solo e a atmosfera, aumentando as reservas de carbono orgânico total devido à redução na velocidade de decomposição da matéria orgânica (Bayer et al., 2000a).

O carbono tem a capacidade de se agrupar em variados setores dentro da MOS, e através do fracionamento granulométrico, é possível mensurar as quantidades de carbono orgânico em partículas (CO_p > 53 µm) e o carbono orgânico ligado aos minerais (CO_{am} < 53 µm) (Junior et al., 2021). A divisão do tamanho de partículas da Matéria Orgânica do Solo em suas diferentes partes pode ser útil para avaliar as mudanças causadas pela prática devido à maior sensibilidade dessas divisões diante da manipulação (Cambardella & Elliott, 1992).

Com base nas reservas de carbono orgânico total (COT) e de carbono nas diferentes frações da MOS, é viável determinar o índice de manejo de carbono (IMC), o qual possibilita analisar de maneira integrada o impacto das práticas de manejo na quantidade e na qualidade da matéria orgânica do solo, auxiliando na avaliação da saúde e produtividade do solo (Blair et al., 1995).

As projeções do IMC são conduzidas levando em conta um índice de estoque de carbono (IEC) que conecta a reserva do tratamento em análise com a reserva de um sistema de comparação. Geralmente, como base, são utilizadas áreas que não sofreram intervenção

humana (base positiva), mas também podem ser consideradas áreas sujeitas à deterioração (base negativa). Além disso, para calcular o IMC, é preciso obter o índice de labilidade do carbono (ILC), que analisa a relação entre os compartimentos de MO (lábeis e não lábeis). Desse modo, o IMC é determinado utilizando como referência um sistema de comparação IMC=100 (Conceição et al., 2014).

Apesar do aumento de MOS no sistema de plantio direto e da alta quantidade de resíduos depositados na superfície do solo, é importante ressaltar que esse aumento também é influenciado por diversos fatores, como condições climáticas, temperatura, índice pluviométrico, tipo de solo e sua composição mineral (Ohland et al., 2019).

2.5 ATRIBUTOS DO SOLO QUE INFLUENCIAM NOS TEORES DE MATÉRIA ORGÂNICA

Entre as características do solo que podem ser utilizadas para analisar o impacto dos diferentes sistemas de uso, um dos pontos mais importantes é a matéria orgânica do solo (MOS) (Nanzer et al., 2019). É de extrema importância a adoção da cobertura morta para preservar as propriedades do solo e garantir a manutenção da umidade (Costa et al., 2024). É fundamental avaliar a quantidade de carbono armazenada no solo, assim como os atributos do solo que influenciam nesse armazenamento (Marques et al., 2013).

Os atributos físicos do solo desempenham papel determinante na dinâmica da matéria orgânica, influenciando tanto o acúmulo quanto a estabilização do carbono (Cunha et al., 2017). Entre esses atributos, destacam-se a densidade do solo, a porosidade total, a macroporosidade, a microporosidade e a estabilidade de agregados (Sales et al., 2018). A densidade, quando elevada, restringe o crescimento radicular, dificulta a infiltração de água e limita a atividade microbiana, comprometendo a ciclagem da matéria orgânica (Silva et al., 2022).

A porosidade total e a distribuição entre macroporos e microporos são essenciais para a aeração e retenção de água, condições diretamente relacionadas à decomposição e proteção da matéria orgânica (De Oliveira et al., 2024). Práticas que favorecem a manutenção da estrutura do solo, como o uso de resíduos vegetais e o preparo mínimo, promovem maior porosidade e estabilidade física, resultando em maior proteção da matéria orgânica contra perdas por mineralização (Loss et al., 2017; Costa et al., 2024).

Para avaliar a qualidade do solo, é importante identificar algumas de suas características que são consideradas como sinais indicativos, os quais podem ser classificados em três categorias principais: os temporários, que mudam rapidamente ou são afetados pelas práticas agrícolas, como por exemplo: umidade do solo, densidade, pH, disponibilidade de nutrientes; os permanentes, que são inerentes ao solo, como por exemplo: profundidade, camadas restritivas, textura, mineralogia; e, por fim, os intermediários, que refletem a importância do solo em cumprir suas funções, como por exemplo: agregação, biomassa microbiana, quociente respiratório, carbono orgânico total e ativo (Conceição et al., 2005).

As mudanças em sua quantidade e qualidade de matéria orgânica podem influenciar processos nos ecossistemas e benefícios ambientais, como a capacidade de retenção de íons, a formação e retenção de água nos solos e a habilidade do solo em armazenar carbono atmosférico capturado pelas plantas (Benites, 2010). Os componentes da matéria orgânica abrangem uma variedade de elementos em sua constituição, sendo os mais comuns o carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S) (CHONPS) (Bettoli et al., 2023).

Alguns estudiosos argumentam que as variações entre as espécies vegetais também desempenham um papel significativo na influência do armazenamento de carbono e nitrogênio no solo, devido às diferentes taxas de decomposição da matéria orgânica entre as diferentes espécies (Dong et al., 2022). Estudos anteriores demonstraram que o uso de adubo orgânico acelera a biodiversidade do solo e a capacidade de armazenamento de carbono mais eficientemente do que o fertilizante químico (Wang et al., 2021).

As características físicas do solo podem ser modificadas pelo modo como é manejado, incluindo a densidade, a distribuição e o tamanho dos poros, na qual essas mudanças afetam as características físico-hídricas, como a porosidade do solo, a capacidade de reter água, a quantidade de água disponível para as plantas e a resistência à penetração (RP) (Agne & Klein, 2014).

A resistência à mudança do carbono orgânico no solo é influenciada pela preservação dos aglomerados de partículas (isolamento físico), enquanto a transformação do carbono orgânico no solo depende da ação dos microrganismos (decomposição mineralizada e assimilação acumulativa), que frequentemente ocorrem ao mesmo tempo e apresentam uma relação intrincada (Zhao et al., 2023).

3 METODOLOGIA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

A pesquisa foi desenvolvida na Fazenda Experimental Mangabeira (Figura 2) do Instituto de Educação Agricultura e Ambiente da Universidade Federal do Amazonas, campus de Humaitá ($07^{\circ}30'22''$ S e $63^{\circ}01'15''$ W) que está localizado na Mesorregião-Sul do estado do Amazonas, e possui uma área de aproximadamente 33.072 km^2 e uma população estimada em 57.473 habitantes (IBGE, 2022). Segundo a classificação de Köppen, a zona climática da região apresenta clima tropical úmido com temperaturas médias anuais variando entre 25 e 27 °C, com valores mínimos e máximos entre 17 e 36 °C mensal, com umidade relativa do ar entre 85 e 90% (Martins, 2019).

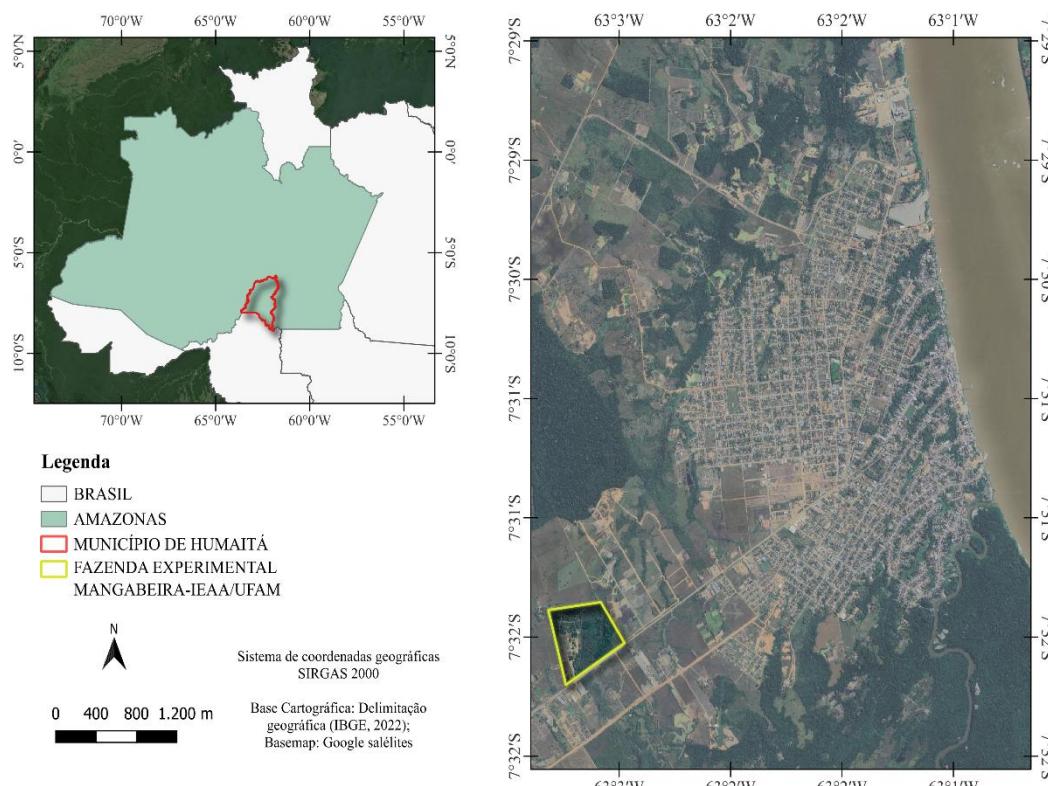


Figura 2: Mapa de localização da Fazenda Experimental Mangabeira do IEAA/UFAM, Campus de Humaitá-AM.

Fonte: Elaboração própria (2024).

O solo da área experimental é classificado como Argissolo, sendo esta área, oriunda de campos nativos. A Tabela 1, apresenta a caracterização física e química do solo da área experimental nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm.

Tabela 1: Caracterização física e química do solo da área experimental, nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm.

	pH	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	COT	Areia	Silte	Argila
	H ₂ O	----- cmolc dm ⁻³ -----			----- g kg ⁻¹ -----			
0-20 cm	4,23	3,22	0,36	0,30	4,93	173,55	783,22	43,23
20-40 cm	4,34	3,08	0,37	0,64	2,32	170,44	787,61	41,95

Fonte: Elaboração própria (2024).

Os valores de pH em água indicaram acidez em ambas as camadas, com leve aumento com a profundidade (4,23 na camada superficial e 4,34 na subsuperficial). O alumínio trocável (Al³⁺) apresentou valores elevados nas duas camadas, sendo ligeiramente menor na profundidade de 20-40 cm (3,08 cmolc kg⁻¹) em comparação à camada de 0-20 cm (3,22 cmolc kg⁻¹), refletindo a natureza ácida do solo.

Quanto às bases trocáveis, observou-se teores baixos de cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺), sendo o Mg²⁺ mais elevado na camada mais profunda (0,64 cmolc kg⁻¹) do que na superficial (0,30 cmolc kg⁻¹). O carbono orgânico total (COT) apresentou maiores valores na camada de 0-20 cm (4,93 g kg⁻¹), decrescendo para 2,32 g kg⁻¹ na camada de 20-40 cm, comportamento comum devido à maior presença de resíduos vegetais e atividade microbiana superficial.

A análise granulométrica revelou predominância da fração silte, com valores superiores a 780 g kg⁻¹ em ambas as camadas. A fração areia variou entre 173,55 g kg⁻¹ (0-20 cm) e 170,44 g kg⁻¹ (20-40 cm), enquanto a argila apresentou baixos teores, inferiores a 45 g kg⁻¹, caracterizando o solo como muito siltoso.

Esses dados são fundamentais para contextualizar as condições iniciais da área experimental antes da aplicação dos tratamentos, embora os atributos químicos sejam apresentados apenas para efeito de caracterização da área experimental, não sendo objeto de análise ou discussão neste estudo.

3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

As atividades para o projeto iniciaram em agosto de 2023, realizando primeiramente a limpeza da área, seguida da limpeza manual.

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, com quatro blocos (Blocos I a IV), totalizando 48 unidades experimentais (figuras 3 e 4). Cada bloco continha doze parcelas, organizadas em três linhas e quatro colunas, caracterizando um fatorial 3x4, distribuídas com base em três sistemas de preparo do solo, Manejo Convencional (MC), Preparo para Sistema Plantio Direto (Grad + Esc) e Plantio Direto (PD), sendo este caracterizado como fator principal, combinados com quatro doses de calcário: 0, 2, 4 e 6 t/ha¹, sendo este o fator secundário. O terceiro fator são os momentos, onde o primeiro momento (M1) foi o pré-cultivo, segundo momento (M2) pós-cultivo do arroz e terceiro momento (M3) pós-cultivo do milho.

As parcelas possuíam dimensões de 7 m x 7 m (49 m²) e estavam separadas por faixas de 3 m entre os blocos. Cada sistema de manejo foi aplicado de acordo com as especificações na figura 3.

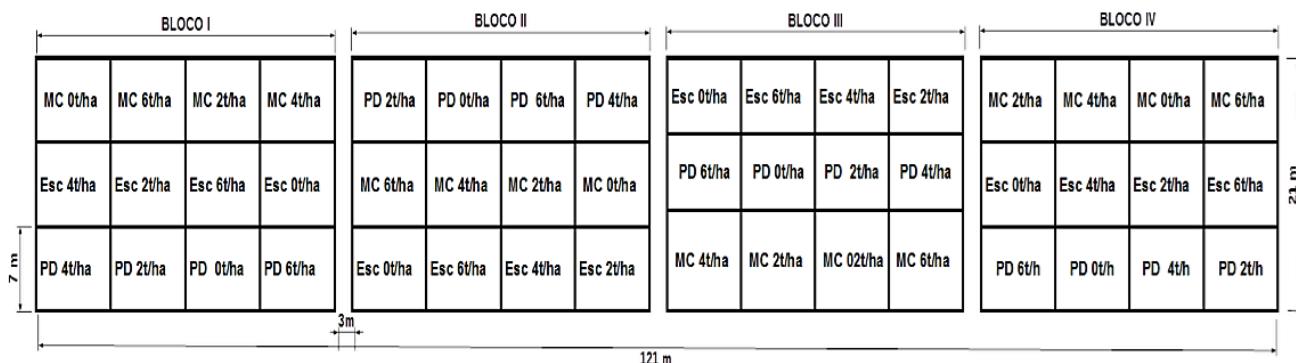


Figura 3: Croqui da área experimental na fazenda mangabeira do IEAA/UFAM (adaptado de Mantovanelli, 2023).



Figura 4: Área do delineamento experimental na Fazenda mangabeira do IEAA/UFAM.

Fonte: Mantovanelli, 2023.

Na instalação do experimento, após o preparo do solo e mecanização, foi feita a implantação da Brachiaria Brizantha cv. Marandu, somente nos tratamentos com sistema de plantio direto para a formação da cobertura do solo (Figura 5).



Figura 5: Implantação da Brachiaria Marandu e formação da cobertura do solo na área experimental.

Fonte: Mantovanelli, 2023

Foram realizadas três amostragens de solo, onde a primeira coleta se deu na pré-implantação do experimento, a segunda coleta foi o pós-cultivo do arroz e a terceira coleta pós-cultivo do milho, foram realizadas a cada final de um cultivo, buscando avaliar os cultivos anteriores para ver os efeitos e as melhorias no experimento (Figura 6).



Figura 6: Coleta pós-cultivo do arroz na área experimental.

Fonte: Mantovanelli, 2023

3.3 METODOLOGIA DE CAMPO

Para as coletas das amostras foram abertas mini trincheiras em cada parcela experimental (Figura 7), foram coletadas amostras de solo em 48 pontos distintos, das quais coletou-se amostras indeformadas, a partir de anéis cilíndricos de metal (anéis volumétricos) e amostras deformadas de solo em três camadas: 0-20 cm; 20-40 cm e 40-60 cm. A coleta de amostras com estrutura preservada foi realizada com o auxílio de extrator tipo Uhland. As amostras deformadas de solo foram secas ao ar, homogeneizadas e passadas em peneira de 2,0 mm para posterior análises. Para o controle de plantas invasoras foram feitos capinias manuais com auxílio de enxadas, bem como o arranquio manual. Já para o controle das pragas e insetos foram aplicados inseticidas e fungicidas, respectivamente, de acordo com a necessidade da cultura. Para as análises físico-química seguiu-se as recomendações do manual de metodologia de análises de solos da Embrapa de 2017.



Figura 7: Mini trincheiras para coleta das amostras deformadas e indeformadas de solos.

Fonte: Mantovanelli, 2023.

As análises físico-químicas foram realizadas nos Laboratório de Pedobiologia e de solos, do Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente da Universidade Federal do amazonas, campus Humaitá.

3.4 ANÁLISES DE LABORATÓRIO

3.4.1 Análises químicas

As análises químicas foram realizadas de acordo com os procedimentos descritos pela Embrapa (2017). O pH em água foi determinado em suspensão solo:água (1:2,5), após agitação por 30 minutos e repouso, utilizando-se pHmetro devidamente calibrado.

Os teores de alumínio trocável (Al^{3+}) foram obtidos por extração com solução de KCl 1 mol L⁻¹ e determinados por titulometria com solução de NaOH 0,025 mol L⁻¹, empregando fenolftaleína como indicador.

Os cátions trocáveis cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) também foram extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e quantificados por espectrofotometria de absorção atômica (EAA), em equipamento devidamente calibrado e operado conforme recomendações do fabricante. Os resultados foram expressos em cmolc kg⁻¹ de solo.

3.4.2 Agregado do solo

Para determinação da estabilidade de agregados foi utilizada as amostras em estrutura preservada segundo Kemper e Chepil (1965), com adaptações para o uso de uma série de peneiras com diferentes diâmetros de malha. As amostras foram inicialmente secas ao ar em temperatura ambiente. Após a secagem, o solo foi destorrado manualmente, com cuidado para não destruir os agregados naturais. Em seguida, essas amostras foram pesadas em 50 g da amostra tratada e 50 g para amostra de controle (branco) (Figura 8).



Figura 8: Destorramento e pesagem dos agregados do solo.

Fonte: Elaboração própria (2025).

As amostras tratadas foram submetidas ao umedecimento por capilaridade dispostas sobre a peneira de maior diâmetro (4,00 mm). Após o umedecimento, as amostras foram transferidas para um sistema composto por sete peneiras sobrepostas, com os seguintes diâmetros de malha: 4,00 mm; 2,00 mm; 1,00 mm; 0,50 mm; 0,25 mm; 0,125 mm e 0,063 mm. O conjunto de peneiras foi imerso em um recipiente com água e acoplado a um sistema de agitação vertical (agitador de Yoder), realizando movimentos oscilatórios regulares durante 15 minutos, simulando o impacto da água sobre os agregados (Figura 9).



Figura 9: Umedecimentos e agitação dos agregados do solo em sistema Yoder.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Concluída a agitação, as peneiras foram cuidadosamente retiradas e os agregados retidos em cada malha foram lavados com água para remoção das partículas. Posteriormente, os materiais foram transferidos para latas devidamente identificados e levados à estufa a 105 °C por 24 horas para secagem completa (Figura 10).



Figura 10: Secagem das amostras de agregados do solo.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Após a secagem, a massa de solo nas latas foi pesada em balança analítica de precisão e os dados foram utilizados para o cálculo da distribuição do tamanho dos agregados e do Diâmetro Médio Ponderado (DMP), conforme equação 1:

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

Em que:

- x_i é o diâmetro médio da classe de agregados
- w_i é a fração em massa retida naquela classe, dividida pela massa total dos agregados secos.

E para cálculo do DMG que representa a média geométrica dos diâmetros das classes, sendo menos influenciado por valores extremos e, portanto, mais sensível à fragmentação dos agregados. Calcula-se por (Eq 2):

$$DMG = \exp(\sum(w_i \cdot \ln x_i)) \quad 2$$

Onde:

- $\ln x_i$ é o logaritmo natural do diâmetro médio da classe i ;
- w_i é a fração de massa em cada classe, como na fórmula do DMP.

Esse procedimento permite avaliar a resistência dos agregados à ação da água, o que está relacionado à suscetibilidade do solo à erosão, compactação e perda de estrutura. Solos bem estruturados apresentam maior proporção de agregados estáveis.

3.4.3 Granulometria

A análise granulométrica do solo foi realizada conforme os procedimentos descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (2017), com o objetivo de determinar as frações texturais de areia, silte e argila para fins de caracterização física das amostras. Inicialmente, o solo foi seco ao ar, destorrado manualmente e peneirado em malha de 2 mm, obtendo-se a fração terra fina. Pesou-se 20 g de algumas amostras aleatórias, onde foi transferida para garrafas plásticas de 500 ml, aos quais foram adicionados 100 mL de água destilada e 10 ml de solução de Hidróxido de sódio (NaOH) 1 mol L⁻¹ agente dispersante.

As amostras foram agitadas mecanicamente em agitador horizontal por 16 horas contínuas, a fim de promover a completa dispersão das partículas do solo. Após esse período, o conteúdo foi transferido por meio de lavagem com água destilada com auxílio de pisseta graduada, para cilindros de sedimentação com capacidade de 1 litro, sendo agitadas utilizando bastão com a tampa plástica durante um minuto e posteriormente, completando-se o volume com água destilada até a marca (figura 11).



Figura 11: Análise granulométrica do solo.

Fonte: Elaboração própria (2025).

A separação das frações granulométricas texturais baseou-se na diferença de velocidade de sedimentação das partículas em suspensão, conforme a lei de Stokes. Primeiramente, o solo foi agitado lentamente por 16 horas em um aparelho agitador mecânico tipo Wagner, com a rotação ajustada para cerca de 50 rpm, após a adição de dispersante químico (NaOH 0,1 N). Nesse intervalo, o movimento vertical das partículas na suspensão foi estabilizado. Após esse período, foi pipetado um volume de 25 ml da suspensão para a determinação da argila. As leituras foram realizadas por sensor de temperatura em agitador magnético MA 085/CT, após agitação das amostras, leu-se as temperaturas para corrigir a velocidade de sedimentação das partículas em suspensão. A fração areia foi determinada separadamente, por filtração do material retido em peneira com malha de 0,053 mm, em seguida as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 24 horas.

A fração silte foi calculada por diferença entre 100% e a soma das porcentagens de areia e argila. Os resultados das frações texturais foram expressos em porcentagem da massa total da amostra seca, e utilizados exclusivamente para fins de caracterização física dos solos estudados.

3.4.4 Análise Físico-hídrico

As análises de densidade, macro e microporosidade e porosidade total prosseguiram adotadas pelo método do anel volumétrico as quais foram determinadas por equilíbrio em mesa de tensão, com utilização de paquímetro para mensurar volume do anel, liga de látex e tecido para evitar perdas do torrão, as amostras foram levadas à estufa em temperatura de 105°C para secagem do solo (EMBRAPA 2017), conforme Figura (12). Para a resistência do solo a penetração e umidade do solo foram mensuradas em campo, por meio de um Penetrógrafo de campo e um medidor de umidade de solo respectivamente, percorrendo todas as parcelas do experimento apenas na camada arável, em torno de 0,20 m.



Figura 12: Análises físicas do solo pelo método do anel volumétrico em mesa de tensão.

Fonte: Elaboração própria (2025).

3.4.5 Carbono orgânico total

A determinação do teor de matéria orgânica do solo foi realizada com base na quantificação do carbono orgânico total (COT), utilizando o método de Walkley-Black modificado por Yeomans e Bremner (1988), com aquecimento externo. Esse método se baseia na oxidação do carbono orgânico por meio de uma solução de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em meio ácido (H_2SO_4). Após a reação de oxidação, a quantidade de dicromato excedente é titulada com solução padronizada de sulfato ferroso ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$), permitindo estimar a fração de carbono oxidada.

A quantidade de carbono orgânico no solo (em %) é calculada com a equação 3:

$$C (\%) = [(V_{branco} - V_{amostra}) \times N \times 0,003 \times 100] / m \quad 3$$

Onde:

V_{branco} = volume de $FeSO_4$ gasto na titulação do branco (mL);

$V_{amostra}$ = volume de $FeSO_4$ gasto na titulação da amostra (mL);

N = normalidade da solução de $FeSO_4$;

0,003 = equivalente em gramas de carbono oxidado por mL de solução 1 N de dicromato (considerando 1 mol de dicromato oxida 3 mols de carbono);
m = massa da amostra de solo (g).

Em geral, esse método é eficiente na estimativa do carbono orgânico, especialmente em solos com teores moderados de matéria orgânica. Entretanto, como nem todo o carbono é oxidado na reação (estima-se uma eficiência de 75% no método original), o uso de aquecimento externo visa aumentar a recuperação da fração oxidável e melhorar a precisão dos resultados.

3.4.6 Fracionamento da matéria orgânica

Para as análises do fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica, seguiu-se a metodologia descrita por Cambardella & Elliot (1992), onde pesou-se uma alíquota de aproximadamente 20 g de solo seco ao ar separada para o procedimento. Essas amostras de solos pesadas foram transferidas para garrafas plásticas de 500 ml devidamente identificadas, adicionado à solução de dispersão 80 ml de Hexametafosfato de Sódio puro a 5 g/L, e submetidas a agitação suave por 16 h em agitador horizontal, por aproximadamente 115 rpm, para evitar a quebra mecânica dos agregados maiores e preservar a fração particulada (Figura 13).



Figura 13: Agitação das amostras de solo para o fracionamento físico.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Após a dispersão das amostras, a suspensão é vertida sobre uma peneira de 53 μm (micrômetros), estas são lavadas cuidadosamente utilizando um jato leve de água destilada, para evitar perda da amostra, e o material retido na peneira ($> 53 \mu\text{m}$) que contém areia e matéria orgânica particulada (COP) foram transferidos com auxílio de jatos d'água com pisseta graduada para recipientes de alumínio (latinhas de pesagem) (Figura 14).



Figura 14: Fracionamento da matéria orgânica particulada.

Fonte: Elaboração própria (2025).

As latinhas com o material foram levadas à estufa a 60 °C por 48 horas, até secagem completa. Após o resfriamento em dessecador, as amostras secas foram moídas manualmente em almofariz de porcelana até completa homogeneização e pesados 0,25 g das amostras em Erlenmeyer de 250 ml em balança analítica de precisão para análise posterior. A fração seca foi utilizada para determinação do carbono orgânico total (COT) pelo método de Walkley-Black modificado (Figura 15).



Figura 15: Pesagem das amostras após maceração.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Após a pesagem das amostras, foram adicionadas 10 ml de solução de dicromato de potássio 1,0 N e aquecidas em chapa aquecedora em capela durante aproximadamente 5 minutos ou até seu aquecimento, posteriormente esperou o tempo de resfriamento das amostras para adicionar 80 ml de água destilada e 2 ml de ácido ortofosfórico, 3 gotas do indicador difenilamina para posterior titulação com sulfato ferroso 0,5 N até a mudança de cor (de vinho para azul esverdeado) (Figura 16). Repetiu-se o procedimento sem a amostra, para obter o valor do branco (volume total de dicromato).



Figura 16: Análise do carbono orgânico.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Após a titulação, é determinado o teor de carbono orgânico em porcentagem (%) ou g/kg. O carbono orgânico particulado é calculado a partir da massa conhecida da amostra total de solo para o fracionamento, expressa no seguinte cálculo (Eq.4):

$$\text{COP (g/kg de solo)} = \frac{\text{massa da fração} > 53 \mu\text{m (g)}}{\text{massa total de solo fracionado (g)}} \times \text{teor de C na fração (g/kg)} \quad 4$$

O carbono orgânico total (COT) foi determinado em amostra integral de solo, enquanto o carbono orgânico particulado (COP) foi quantificado na fração $> 53 \mu\text{m}$, obtida pelo fracionamento físico. O carbono orgânico mineral (COM) ou carbono orgânico associado aos minerais, foi estimado por diferença entre o COT e o COP, conforme a equação 5:

$$\text{COM} = \text{COT} - \text{COP}$$

5

Os resultados foram expressos em gramas de carbono por quilogramas de solo seco (g C/kg).

3.4.7 Taxa de Decomposição (K) e Tempo de Meia-vida ($T^{1/2}$) da Palhada

A taxa de decomposição K da palhada de braquiária e o tempo de meia-vida ($T^{1/2}$) foram determinados por meio da quantificação da massa seca remanescente ao longo do tempo, utilizando um modelo cinético de decomposição de primeira ordem. Para isso, foram confeccionadas bolsas de decomposição (litter bags) com malha de náilon de 2 mm e dimensões de 25 x 25 cm, nas quais foram acondicionados resíduos secos e pesados de palhada de braquiária Marandu. As bolsas foram distribuídas uniformemente sobre o solo em áreas experimentais e coletadas em intervalos regulares de 10 dias, até 30 dias após a instalação.

Após cada coleta, o material remanescente nas bolsas foi seco em estufa a 60 °C até atingir peso constante. A massa seca foi registrada e expressa em relação à massa inicial (tempo zero), permitindo calcular a fração de palhada remanescente em cada tempo. Com base nesses valores, foi ajustado um modelo exponencial de decomposição de primeira ordem, conforme a equação 6:

$$y(t) = y_0 \cdot e^{-kt}$$

6

Em que $y(t)$ é a massa remanescente no tempo t , y_0 é a massa inicial da palhada, k é a constante de decomposição (dia^{-1}), e t é o tempo em dias. Calculou-se o tempo necessário para que metade da matéria orgânica se decomponha (tempo de meia-vida).

Os resultados foram representados graficamente por meio da curva de decomposição (massa remanescente x tempo), e os valores de k , $T^{1/2}$ e o coeficiente de determinação (R^2) do modelo foram utilizados como indicadores da velocidade de decomposição da palhada sob diferentes tratamentos.

3.4.8 Análise estatística

Após a coleta dos dados, realizou-se a verificação dos pressupostos de normalidade e homogeneidade por meio de testes estatísticos disponibilizados nos softwares SISVAR e AGROESTAT. Atendendo a esses pressupostos, aplicou-se a análise de variância (teste F) ao nível de 5% de significância. Para as variáveis com diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott (1974). Nos casos de variáveis quantitativas, realizou-se análise de regressão, adotando-se a equação de maior grau significativo. Quando constatada significância estatística, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, também ao nível de 5% de probabilidade, conforme a natureza dos dados e os requisitos específicos de cada variável analisada.

4 RESULTADOS

4.1 Físico-hídricos

Valores de médias de Porosidade Total (PT), Macro (MaP), Micro (MiP), Densidade do solo (DS), Resistência do solo a penetração (RP) e Umidade (Um) em diferentes preparamos de solo e doses de calcário nos momentos M1, M2 e M3, estão contidos nas tabelas 2 e 3. Na profundidade de 0-20 cm, com exceção da RP, em que foi observado valores superiores no Plantio direto (PD) em relação a Escarificação (ESC) em M2 e M3. É possível observar que os diferentes métodos de preparo do solo, manejo convencional (MC), (PD e ESC) não apresentaram diferenças significativas entre si nas demais variáveis analisadas nos três momentos. Uma das características do PD é o não revolvimento ou revolvimento mínimo do solo isso pode ter relação com valores mais elevados no PD em relação aos demais manejo de solo. Contudo, apesar dos manejos relacionados ao preparo de solo utilizado após M1 esperava-se valores de RP menores no M2 e M3 em relação ao M1 o que não foi observado, entretanto, a umidade do solo pode ter influenciado, uma vez que estas variáveis são inversamente proporcionais, solo com umidade elevada oferece menos resistência do solo a

penetração, o que pode ser observado em M1, de forma contraria em M2 observa-se valores menores de umidade em relação a M1, o que proporcionou maiores resistências a penetração com valores similares ao M1.

Tabela 2: Valores de médias de atributos físico-hídrico em função de preparo de solo e doses de calcário e três momentos na profundidade de 0-20 cm. Humaitá, AM. 2025.

Tratamentos	M1					M2					M3							
	PT	MaP	MiP	DS	RP	Um	PT	MaP	MiP	DS	RP	Um	PT	MaP	MiP	DS	RP	Um
	m ³ .m ⁻³	Mg m ⁻³			Mpa		m ³ .m ⁻³	Mg m ⁻³			Mpa		m ³ .m ⁻³	Mg m ⁻³			Mpa	
Preparo de solo																		
PD	0,62aA	0,08 aB	0,54aA	1,67aA	1,40aA	0,29aA	0,44aB	0,11aA	0,33aB	1,30aB	2,06aA	0,21aB	0,46aB	0,05aC	0,34aB	1,30aB	1,59aA	0,24aAB
MC	0,63aA	0,07aB	0,56aA	1,70aA	1,36aB	0,32aA	0,43aB	0,11aA	0,32aB	1,33aB	1,61abA	0,19aB	0,43aB	0,05aC	0,30aB	1,31aB	1,25abB	0,22aB
ESC	0,62aA	0,07aB	0,55aA	1,64aA	1,23aA	0,30aA	0,43aB	0,10aA	0,34aB	1,35aB	1,29 bA	0,20aB	0,46aB	0,05aC	0,34aB	1,31aB	0,99bA	0,23aB
Doses de Calcário																		
0 t/ha	0,62aA	0,07aA	0,54aA	1,64aA	1,46aA	0,31aA	0,45aB	0,10aA	0,35aB	1,33aB	1,50 aA	0,21 aB	0,41bB	0,04aB	0,30aB	1,35aB	1,39 aA	0,24aB
2 t/ha	0,61aA	0,08aA	0,52aA	1,69aA	1,34aAB	0,28aA	0,42aB	0,11aA	0,31aB	1,33aB	1,85 aA	0,19 aB	0,46abB	0,05aB	0,33aB	1,29aB	1,12 aB	0,24aAB
4 t/ha	0,65aA	0,07aB	0,57aA	1,67aA	1,30aA	0,32aA	0,43aB	0,11aA	0,32aB	1,32aB	1,50 aA	0,19 aB	0,45abB	0,04aC	0,33aB	1,29aB	1,15 aA	0,23aB
6 t/ha	0,62aA	0,06aB	0,55aA	1,69aA	1,22aA	0,29aA	0,44aB	0,11aA	0,33aB	1,33aB	1,77 aA	0,21 aB	0,48 aB	0,05aB	0,36aB	1,31aB	1,45 aA	0,22aB
EP de M*	0,63 A	0,07 B	0,55 A	1,57 A	1,33AB	0,30 A	0,44 B	0,11 A	0,33B	1,33 B	1,65 A	0,20 C	0,45 A	0,05 C	0,33 B	1,31 B	1,28 B	0,23B

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem entre si ($P>0,05$) pelo teste de Tukey. *Efeito principal do fator momento, comparação na linha em letras maiúsculas.

Tabela 3: Valores de médias de atributos físico-hídrico em função de preparo de solo e doses de calcário e três momentos na profundidade de 20-40 cm. Humaitá, AM. 2025.

Tratamentos	M1						M2						M3					
	PT	MaP	MiP	DS	RP	Um	PT	MaP	MiP	DS	RP	Um	PT	MaP	MiP	DS	RP	Um
		$m^3.m^{-3}$		$Mg m^{-3}$		Mpa		$m^3.m^{-3}$		$Mg m^{-3}$		Mpa		$m^3.m^{-3}$		$Mg m^{-3}$		Mpa
Preparo de solo																		
PD	0,61aA	0,08aA	0,53aA	1,76aA	-	-	0,42aB	0,08aA	0,34aB	1,45bB	-	-	0,43aB	0,03aB	0,35aB	1,43aB	-	-
MC	0,61aA	0,07aA	0,54aA	1,84aA	-	-	0,42aB	0,09aA	0,32aB	1,41bB	-	-	0,43aB	0,03aB	0,35aB	1,42aB	-	-
ESC	0,63aA	0,07aA	0,56aA	1,74aA	-	-	0,43aB	0,09aA	0,34aB	1,57aB	-	-	0,41aB	0,04aB	0,32aB	1,41aC	-	-
Doses de Calcário																		
0 t/ha	0,64aA	0,07aA	0,57aA	1,78abA	-	-	0,42aB	0,09aA	0,33aB	1,47aB	-	-	0,44aB	0,03aB	0,35aB	1,43aB	-	-
2 t/ha	0,63aA	0,09aA	0,54aA	1,78abA	-	-	0,43aB	0,09aA	0,34aB	1,47aB	-	-	0,41aB	0,03aB	0,33aB	1,41aB	-	-
4 t/ha	0,62aA	0,07aA	0,55aA	1,70 bA	-	-	0,42aB	0,09aA	0,33aB	1,48aB	-	-	0,43aB	0,04aB	0,34aB	1,43aB	-	-
6 t/ha	0,60aA	0,08aA	0,52aA	1,86 aA	-	-	0,42aB	0,09aA	0,33aB	1,50aB	-	-	0,42aB	0,03aB	0,34aB	1,42aB	-	-
EP de M*	0,62 A	0,08 ^a	0,54 A	1,78 A	-	-	0,42 B	0,09 A	0,33 B	1,48 B	-	-	0,42 B	0,03 B	0,34 B	1,42 B	-	-

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem entre si ($P>0,05$) pelo teste de Tukey. *Efeito principal do fator momento, comparação na linha em letras maiúsculas. – Não houve análise dessas variáveis na profundidade.

Observou-se uma redução na qualidade física do solo ao longo do tempo, com diminuição da porosidade total e microporosidade de M1 para M2 e M3, não houve diferença significativa entre preparamos de solo e entre doses de calcário, entretanto houve uma diminuição significativa ao longo do tempo (de M1 para M2/M3). Essa diminuição se deve aos preparamos de solo realizado após M1, uma vez que o rompimento da estrutura do solo causou a descompactação do estado natural do solo, diminuindo a DS, em M3, mesmo sem preparo de solo a DS manteve-se menor em relação a M1, evidenciando um efeito residual de preparo de solo eficiente para múltiplos cultivos, outro fator importante para diminuição da DS é a ação dos sistemas radiculares de arroz e milho que proporciona formação de bioporos, aumento na atividade biológica do solo, ciclagem da matéria orgânica que melhora agregação do solo. Quanto às doses de calcário (0 a 6 t/ha), com exceção da PT no M3, em que se observou valores superiores na dose 6 t/ha em relação a dose 0 t/ha, não houve efeito significativo nos demais parâmetros físicos avaliados, logo, não promoveram alterações nas propriedades físicas do solo. A ausência de diferenças significativas entre as doses em todos os momentos sugere que o calcário atua predominantemente na correção química do solo, enquanto as melhorias físicas dependem essencialmente do manejo mecânico.

Na profundidade de 20-40 cm, a análise dos fatores preparo de solo e doses de calcário ao longo dos momentos M1 (inicial, antes dos manejos), M2 (após o cultivo do arroz) e M3 (após o cultivo do milho) indica diferenças significativas em alguns parâmetros. No fator preparo do solo, a PT, DS e a Micro diminuíram do M1 para o M2/M3. A escarificação (ESC) proporcionou a maior redução progressiva da DS na camada de 20-40 cm devido a descompactação mecânica na subsuperfície e favoreceu processos biológicos nesta camada como crescimento radicular nas fissuras abertas pela escarificação.

Em relação às doses de calcário, o PT e o Micro apresentaram redução significativa do M1 para o M2. No efeito principal, essas mesmas variáveis também diminuíram do M1 para o M2, incluindo a DS. De modo geral, os resultados apontam que houve reduções significativas de PT e Micro após o cultivo do arroz, indicando mudanças estruturais no solo, além de uma redução na densidade do solo em alguns tratamentos, sugerindo alterações na compactação ao longo do tempo.

4.2 Agregados

A tabela 4 mostra médias das variáveis de agregados de 4mm, 2mm, 1mm, <1mm, DMG e DMP em função de doses de calcário e preparo de solo em 3 momentos na profundidade de 0-20 cm. Com exceção da variável agregados 2 mm, é possível observar diferenças significativas analisando o efeito do fator momento para no preparo de solo. Com exceção do PD em 4mm e DMP, os preparamos de solo ESC e MC no fator M1 foram superiores em relação a M2/M3 para as variáveis de agregados 4mm, DMG e DMP. Esse fato ocorre devido a estrutura do solo mais preservada em M1 no qual não sofreu intervenção mecânica e química. Já em M2, a intervenção mecânica afetou de forma significativa a estrutura do solo, diminuindo as variáveis citadas de macro agregados. No plantio direto não ocorreu essa diferença de M1 para os demais momentos, avaliando as variáveis 4mm e DMP, possivelmente devido a intervenção mecânica em M2 ter sido menos agressivo em relação aos demais preparo de solo, uma vez que uma das características do PD é o não revolvimento do solo ou revolvimento mínimo.

Tabela 4: Valores de médias de estabilidade de agregados em função de preparo de solo e doses de calcário e três momentos na profundidade de 0-20 cm. Humaitá, AM. 2025.

Fatores		M1	M2	M3	EP*	Fatores		M1	M2	M3	EP*	Fatores		M1	M2	M3	EP*
4 mm (%)																	
PD	93,21 aA	84,39 aA	87,83 aA	88,47 a		PD	0,89 aA	2,19 aA	2,59 aA	1,89 a		PD	6,17 aA	4,89 aB	5,50 aAB	5,52 a	
MC	92,45 aA	80,71 aB	82,90 abAB	85,35 ab		MC	1,11 aB	3,37 aA	2,65 aAB	2,38 a		MC	6,10 aA	4,68 aB	4,71 abB	5,17 ab	
ESC	93,18 aA	74,22 aB	73,83 bB	80,41 b		ESC	0,90 aB	3,27 aA	4,71 aA	2,96 a		ESC	6,15 aA	3,51 bB	4,17 bB	4,61 b	
0 t/ha	88,74 aA	75,45 aB	71,30 bB	78,50 b		0 t/ha	1,66 aB	3,79 aAB	4,86 aA	3,44 a		0 t/ha	5,60 aA	3,91 aB	4,19 aB	4,57 a	
2 t/ha	93,6 aA	77,70 aB	87,17 aAB	86,16 ab		2 t/ha	0,84 aA	3,11 aA	2,36 aA	2,10 ab		2 t/ha	6,19 aA	4,12 aB	5,14 aAB	5,15 a	
4 t/ha	94,86 aA	85,29 aA	84,92 abA	88,36 a		4 t/ha	0,68 aA	1,48 aA	2,44 aA	1,53 b		4 t/ha	6,41 aA	4,73 aB	5,01 aB	5,38 a	
6 t/ha	94,58 aA	80,65 aB	82,68 abAB	85,97 ab		6 t/ha	0,68 aB	3,39 aA	3,62 aA	2,56 ab		6 t/ha	6,35 aA	4,68 aB	4,85 aB	5,29 a	
EP	92,94 A	79,77 B	81,52B			EP	0,97 B	2,94 A	3,32 A			EP	6,14 A	4,36 B	4,80 B		
2 mm (%)																	
PD	1,65 aA	2,55 aA	1,65 bA	1,95 a		PD	4,24 aA	10,86 aA	9,39 bA	8,16 b		PD	7,05 aA	6,45 aA	6,68 aA	6,73 a	
MC	1,31 aA	2,81 aA	2,67 abA	2,26 ab		MC	5,11 aB	13,09 aA	11,76 abAB	9,99 ab		MC	6,99 aA	6,20 aB	6,35 abAB	6,52 ab	
ESC	1,57 aB	3,88 aA	4,24 aA	3,23 a		ESC	4,33 aB	18,61 aA	18,35 aA	13,76 a		ESC	7,05 aA	5,75 aB	5,76 bB	6,19 b	
0 t/ha	2,08 aB	3,67 aAB	4,44 aA	3,40 a		0 t/ha	7,50 aB	17,08 aA	20,44 aA	15,00 a		0 t/ha	6,75 aA	5,85 aB	5,58 bB	6,06 b	
2 t/ha	1,55 aA	3,21 aA	2,00 bA	2,26 a		2 t/ha	3,98 aB	15,95 aA	9,36 bAB	9,76 ab		2 t/ha	7,08 aA	5,99 aB	6,64 aAB	6,57 ab	
4 t/ha	1,19 aA	2,44 aA	2,54 abA	2,06 a		4 t/ha	3,25 aA	10,78 aA	10,08 bA	8,04 b		4 t/ha	7,16 aA	6,5 aA	6,49 abA	6,72 a	
6 t/ha	1,20 aA	3,00 aA	2,42 abA	2,21 a		6 t/ha	3,52 aB	12,94 aA	12,79 abA	9,75 ab		6 t/ha	7,14 aA	6,2 aB	6,34 abAB	6,56 ab	
EP*	1,5129 B	3,08 A	2,85 A			EP*	4,56 B	14,19 A	13,17 A			EP*	7,03 A	6,13 B	6,26 B		

Com efeito inversamente proporcional, os microagregados 1mm e <1mm, em M2 foram superiores ao momento 1, com exceção do PD. Esse aumento é justificável devido a ação mecânica no preparo de solo com escarificador e aração nos tratamentos ESC e MC respectivamente, que rompe agregados maiores tornando em agregados menores.

Avaliando os efeitos principais de preparo de solo é possível observar que os agregados 4mm, DMG E DMP foram superiores no PD e menor no preparo com escarificador este cenário ocorre devido a ação mais agressiva da escarificação em relação ao manejo empregado no PD que consistiu em apenas no uso de uma grade niveladora.

Com relação ao efeito do fator doses de calcário, aos agregados 4mm e índices DMG e DMP, apresentaram diferença significativa no M1 em relação ao M2/M3, esse cenário está mais ligado ao preparo do solo do que o efeito do calcário. Entretanto a dose 4 t/ha manteve-se estável sem diferenças significativas nos três momentos para as variáveis de agregados 4mm, 2mm, 1mm, <1mm e DMP. Este cenário foi possível devido a correção do pH do solo, nesta situação complexos estáveis formados a partir de matéria orgânica atuam como agentes cimentantes contribuindo para melhor agregação do solo. Além disso, o fornecimento de cálcio pela aplicação de calcário neutraliza as cargas negativas das argilas, promovendo a formação de microagregados estáveis que serve de base para formação de agregados maiores, isso pode explicar valores superiores de macro e microagregados na de 4 t/ha.

Avaliando os efeitos principais para doses de calcário, nota-se que a dose 4 t/ha foi superior as demais doses para agregados 4mm e índice DMP, em contrapartida a dose 0 t/ha obteve-se menores valores. Para os microagregados 1mm e <1mm observa-se valores superiores quando utilizado a dose 0 t/ha. A dose 2 t/ha e 6 t/ha não diferiram entre si para todas as variáveis avaliadas.

As médias das variáveis de agregados de 4mm, 2mm, 1mm, <1mm, DMG e DMP em função de doses de calcário e preparo de solo em 3 momentos na profundidade de 20-40 cm estão contidas na tabela 5. Para as variáveis agregados 4mm, DMG E DMP, observando o fator momento, nota-se que não houve diferenças significativas entre M1 e M2 para o PD e MC. De forma contraria o preparo de solo ESC apresentou diferenças significativas entre M1 e M2/M3 para todas as variáveis, exceto agregados 2mm, esse cenário ocorre possivelmente devido a penetração mais profunda das hastes do escarificador rompendo os macroagregados, consequentemente causando sua diminuição e aumento dos microagregados 1mm e <1mm. A análise entre preparo de solo corrobora estas observações, principalmente no M2 em que foi observado diferenças

estatísticas com médias de agregados 4mm, DMG e DMP inferiores em preparo do solo com escarificador em relação ao MC e PD e maiores para as variáveis 1mm e <1mm.

Tabela 5: Valores de médias de estabilidade de agregados em função de preparo de solo e doses de calcário em três momentos na profundidade de 20-40 cm. Humaitá, AM. 2025.

M1		M2		M3		EP*	M1		M2		M3		EP*	M1		M2		M3		EP*			
Fatores		4 mm (%)				Fatores	1 mm (%)				Fatores	DMG (%)				Fatores	DMP (%)				EP		
PD	80,38 aA	70,34 aAB	55,59 aB	68,77 a		PD	4,05 aB	6,22 bAB	9,14 aA	6,47 b	PD	4,72 aA	4,08 aAB	2,97 aB	3,92 a		PD	6,26 aA	5,60 aAB	4,58 aB	5,48 a		
MC	68,63 aA	69,30 aA	51,27 aA	63,07 ab		MC	7,50 aA	6,98 abA	10,18 aA	8,22 ab	MC	3,94 aA	3,99 aA	2,62 aB	3,52 ab		MC	5,53 aA	5,51 aAB	4,26 aB	5,10 ab		
ESC	74,08 aA	48,49 bB	40,75 aB	54,44 b		ESC	5,12 aB	10,73 aA	11,38aA	9,08 a	ESC	4,19 aA	2,39 aB	2,01 aB	2,86 b		ESC	4,12 aA	4,12 bB	3,56 aB	4,50 b		
0 t/ha	76,31 aA	51,98 bB	41,65 aB	56,65 b		0 t/ha	5,36 aB	9,87 aAB	11,96 aA	9,07 a	0 t/ha	4,55 aA	2,75 aB	1,99 aB	3,10 b		0 t/ha	6,02 aA	4,34 bB	3,61 aB	4,66 b		
2 t/ha	79,98aA	61,97 abAB	44,18 ab	62,05 ab		2 t/ha	4,29 aB	8,26 aAB	10,56 aA	7,70 a	2 t/ha	4,71 aA	3,49 abAB	2,28 aB	3,49 ab		2 t/ha	6,25 aA	5,03 abAB	3,82 aB	5,03 ab		
4 t/ha	77,91 aA	78,19 aA	60,32 aA	72,14 a		4 t/ha	4,90 aA	4,89 aA	8,48 aA	6,09 a	4 t/ha	6,11 aA	6,10 aA	4,88 aA	5,70 a		4 t/ha	8,89 aA	8,89 aA	7,70 a	8,89 aA		
6 t/ha	63,24 aA	58,69 abA	50,66 aA	57,53 b		6 t/ha	7,68 aA	8,89 aA	9,93 aA	8,83 a	6 t/ha	3,31 aA	3,00 bA	2,50 aA	2,94 b		6 t/ha	21,26 aA	23,47 abA	31,82 aA	25,52 ab		
EP	74,36 A	62,71 B	49,20 C			EP	5,56 B	7,98 AB	10,23 A		EP	4,28 A	3,49 B	2,54 C			EP	13,36 C	21,74 B	32,49 A		EP*	
		2 mm (%)						< 1mm (%)						DMP (%)								EP*	
PD	5,41 aA	7,13 aA	7,79 aA	6,78 a		PD	10,13 aB	16,29 bAB	27,47 aA	17,96 b	PD	6,26 aA	5,60 aAB	4,58 aB	5,48 a		PD	6,02 aA	4,34 bB	3,61 aB	4,66 b		
MC	8,57 aA	6,25 aA	7,12 aA	7,31 a		MC	15,28 aB	17,45 bB	31,41 aA	21,38 ab	MC	5,53 aA	5,51 aAB	4,26 aB	5,10 ab		MC	9,69 aB	22,02 abAB	35,53 aA	22,42 ab		
ESC	6,13 aA	9,28 aA	9,27 aA	8,22 a		ESC	14,66 aB	31,48 aA	38,58 aA	28,24 a	ESC	11,11 aA	11,91 bA	24,61 aA	15,88 b		ESC	11,11 aA	11,91 bA	24,61 aA	15,88 b		
0 t/ha	6,94 aA	8,57 aA	8,39 aA	7,97 a		0 t/ha	11,36 aB	29,55 aA	37,97 aA	26,30 a	0 t/ha	6,11 aA	6,10 aA	4,88 aA	5,70 a		0 t/ha	21,26 aA	23,47 abA	31,82 aA	25,52 ab		
2 t/ha	6,01 aA	7,73 aA	9,71 aA	7,82 a		2 t/ha	9,69 aB	22,02 abAB	35,53 aA	22,42 ab	2 t/ha	6,25 aA	5,03 abAB	3,82 aB	5,03 ab		2 t/ha	11,11 aA	11,91 bA	24,61 aA	15,88 b		
4 t/ha	6,06 aA	4,99 aA	6,56 aA	5,87 a		4 t/ha	11,11 aA	11,91 bA	24,61 aA	15,88 b	4 t/ha	5,12 aA	4,83 abA	4,22 aA	4,72 b		4 t/ha	13,36 C	21,74 B	32,49 A		EP*	
6 t/ha	7,79 aA	8,93 aA	7,57 aA	8,1 a		6 t/ha	21,26 aA	23,47 abA	31,82 aA	25,52 ab	6 t/ha	5,88 A	5,08 B	4,13 C			6 t/ha	13,36 C	21,74 B	32,49 A		EP*	
EP*	6,70 A	7,55 A	8,06 A			EP*	13,36 C	21,74 B	32,49 A			EP*	5,88 A	5,08 B	4,13 C			EP*	5,88 A	5,08 B	4,13 C		EP*

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem entre si ($P>0,05$) pelo teste de Tukey. *Efeito principal

Avaliando o efeito de doses de calcário nos três momentos, observa-se diferenças significativas entre doses no momento 2 para agregados 4mm, DMP e DMG sendo a dose 4 t/ha superior estatisticamente a dose 0 t/ha. A dose 4 t/ha em todas as variáveis avaliadas manteve-se igual estatisticamente nos três momentos avaliados. Em contrapartida a dose de 0 t/ha apresentou diferenças significativa entre momentos sendo superior em M1 quando comparado com M2 e M3 para as variáveis agregados 4mm, DMP e DMG. Esses eventos evidenciam o efeito positivo da adição de calcário da dose correta para melhorar a estrutura do solo em subsuperfície.

Nota-se diferenças significativas avaliando o efeito principal para o fator momento, com valores superiores no M1 (A), seguida pelo M2 (B) e M3 (C) para as variáveis agregados 4mm, DMG e DMP. Não foi observado diferença significativa em agregados 2mm nos três momentos. O efeito principal para doses foi significativo entre as doses, sendo a dose 4 t/ha superior nas variáveis agregados 4mm, DMG e DMP em relação a dose 0 t/ha. Quanto ao efeito principal para o fator preparo de solo, o PD foi superior estatisticamente ao ESC e igual ao MC para as variáveis agregado 4mm, DMG E DMP.

4.3 Carbono Orgânico Total

Valores de médias de carbono orgânico em função de preparamos de solo e doses de calcário em três momentos na profundidade de 0-20 e 20-40 cm estão contidos na tabela 6. Avaliando o efeito do fator momento dentro do preparo de solo é possível observar que o carbono orgânico na profundidade 0-20 cm foi igual nos três momentos para todas os preparamos de solo. Na profundidade de 20-40, o PD e ESC, foram iguais em todos os momentos, o MC, no M3 foi inferior estatisticamente a M2 e igual a M1. Avaliando o efeito de preparo de solo dentro do fator momento, nota-se que não houve diferenças significativas entre os fatores de preparo de solo no PD, MC e ESC nos três momentos e para as duas profundidades avaliadas.

Tabela 6: Valores de médias de carbono orgânico em função de preparamos de solo e doses de calcário em três momentos na profundidade de 0-20 e 20-40 cm. Humaitá, AM. 2025.

Fatores	M1		M2		M3	
	Co 0-20	Co 20-40	Co 0-20	Co 20-40	Co 0-20	Co 20-40
Preparo de solo						
PD	10,52 aA	5,61 aA	10,89 aA	6,46 aA	12,90 aA	5,15 aA
MC	10,47 aA	5,80 aAB	11,92 aA	6,65 aA	10,28 aA	5,23 aB
ESC	10,18 aA	5,80 aA	10,02 aA	6,68 aA	10,34 aA	5,39 aA
Doses de Calcário						
0 t/ha	10,05 aA	5,79 aA	11,11 aA	6,54 aA	13,94 aA	5,46 aA
2 t/ha	10,81 aA	5,88 aAB	11,06 aA	6,77 aA	10,05 aA	5,12 aB
4 t/ha	10,56 aA	5,90 aAB	11,59 aA	7,08 aA	10,78 aA	4,73 aB
6 t/ha	10,15 aA	5,38 aA	10,02 aA	6,01 aA	9,93 aA	5,71 aA
Efeito Principal*	10,39 A	5,74 B	10,94 A	6,60 A	11,17 A	5,26 B

Médias seguidas de mesma letra, maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem entre si ($P>0,05$) pelo teste de Tukey.

*Efeito principal do fator momento, comparação na linha em letras maiúsculas.

Avaliando o fator momento dentro de doses de calcário é possível observar que nos três momentos avaliando a profundidade 0-20 cm, não houve diferenças significativas em todas as doses aplicadas. Já na profundidade 20-40 cm, o momento 3 para as doses 2 e 4 t/ha, foram inferiores aos momentos 1 e 2, as demais doses foram iguais nos três momentos avaliados. Observando o fator doses de calcário dentro do fator momento é possível observar que não houve diferenças significativas entre as doses aplicadas nos três momentos avaliados e em todas as profundidades avaliadas. Avaliando o efeito principal para o fator momento na profundidade de 0-20 cm, observa-se que não houve diferenças significativas nos três momentos. Na profundidade 20-40 o momento 2 foi superior aos momentos 1 e 3.

A profundidade 40-60 cm apresentou efeito significativo para interação tripla: momentos (M), preparo de solo (PS) e doses de calcário (DC) e estão representadas na tabela 7. Avaliando o fator momento dentro de PS e DC, nota-se que o momento 3 foi superior estatisticamente ao momento 1 e 2, exceto para MCD0 em M1, MCD4 em M2 e ESCD2 em M1 e M2. Avaliando o fator preparo de solo dentro de M e DC é possível observar que o preparo de solo ESC foi inferior estatisticamente quando comparado com o preparo de solo MC no M3D2, os demais preparamos de solo foram iguais para as demais combinações de M x DC.

Tabela 7: Valores de médias de Carbono orgânico em função de preparamos de solo e doses de calcário em três momentos na profundidade de 40-60 cm. Humaitá, AM. 2025.

Fatores	PDD0	PDD2	PDD4	PDD6	MCD0	MCD2	MCD4	MCD6	ESCD0	ESCD2	ESCD4	ESCD6	EP*
	g.kg ⁻¹												
M1	4,10 b	3,76 b	3,71 b	3,28 b	3,34 b	3,67 b	4,43 ab	3,52 b	3,71 b	3,94 a	3,31 b	3,95 b	3,73 b
M2	4,16 b	3,52 b	4,38 ab	2,61 b	4,56 ab	3,80 b	3,22 b	4,10 ab	3,06 b	4,25 a	4,37 b	3,92 b	3,83 b
M3	6,44 a	5,95 a	5,44 a	5,44 a	6,01 a	6,84 a	5,22 a	5,40 a	5,95 a	4,83 a	6,41 a	6,47 a	5,87 a
Fatores	M1D0	M1D2	M1D4	M1D6	M2D0	M2D2	M2D4	M2D6	M3D0	M3D2	M3D4	M3D6	
g.kg ⁻¹													
PD	4,10 a	3,76 a	3,70 a	3,28 a	4,16 a	3,52 a	4,38 a	2,61 a	6,44 a	5,96 ab	5,44 a	5,44 a	4,40 a
MC	3,34 a	3,68 a	4,43 a	3,52 a	4,56 a	3,80 a	3,22 a	4,10 a	6,02 a	6,84 a	5,23 a	5,41 a	4,51 a
ESC	3,70 a	3,94 a	3,31 a	3,95 a	3,06 a	4,25 a	4,38 a	3,92 a	5,96 a	4,83 b	6,41 a	6,47 a	4,52 a
Fatores	M1ESC	M1MC	M1PD	M2ESC	M2MC	M2PD	M3ESC	M3MC	M3PD	-	-	-	-
g.kg ⁻¹													
0 t/ha	3,71 a	3,34 a	4,1 a	3,07 a	4,56 a	4,16 a	5,96 a	6,02 a	6,44 a	-	-	-	4,59 a
2 t/ha	3,95 a	3,68 a	3,77 a	4,25 a	3,8 a	3,52 a	4,83 a	6,84 a	5,96 a	-	-	-	4,50 a
4 t/ha	3,31 a	4,43 a	3,71 a	4,38 a	3,22 a	4,38 a	6,41 a	5,23 a	5,44 a	-	-	-	4,50 a
6 t/ha	3,95 a	3,53 a	3,28 a	3,92 a	4,1 a	2,61 a	6,47 a	5,41 a	5,44 a	-	-	-	4,30 a

Médias seguidas de mesma letra, minúsculas nas colunas, não diferem entre si ($P>0,05$) pelo teste de Tukey.

*Efeito principal, fator momento, preparo de solo e doses de calcário.

Avaliando o efeito de doses de calcário dentro de M e PS, nota-se que não houve diferenças significativas entre doses para todas as combinações de momentos e preparo de solo. O efeito principal dos fatores momentos, preparo de solo e doses de calcário para carbono orgânico é possível observar diferenças significativas para o fator momento, sendo o M3 superior ao M1 e M2, com valores de carbono orgânico de $5,87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. M1 e M2 tiveram desempenho iguais. Avaliando o fator preparo de solo, observa-se que o PD, MC e ESC não diferiram entre si, o fator doses de calcário também não apresentaram diferenças significativas entre as doses aplicadas.

4.4 Fracionamento da matéria orgânica

Valores de médias de fracionamento da matéria orgânica em função de preparamos do solo e doses de calcário em três momentos na profundidade de 0-20 cm está na figura 17. Avaliando o efeito do fator de preparo de solo dentro do fator momento, observa-se que não houve diferenças significativas entre os preparamos de solo em todos os momentos e para todas as variáveis. No entanto avaliando o fator momento dentro do fator preparo de solo, nota-se que os valores de carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado a minerais (COam) e carbono orgânico total (COT) no momento 3 foram superiores ao momento 1 em todos os preparamos de solo, como não houve revolvimento no solo em M1, esperava-se maior preservação de carbono orgânico, entretanto, constata-se menores valores. Em M2, apesar do preparo de solo ter estimulado a decomposição da matéria orgânica, a calagem e o cultivo de arroz contribuíram para um aumento moderado. Em M3, devido a menor perturbação do solo em relação a M2 o cultivo do milho resultou em maiores teores de COT, possivelmente devido a menor perda por oxidação, maior aporte de resíduos de milho, remanescente da cultura do arroz e o residual da calagem realizada em M2 que melhora a atividade microbiana e a estabilização de carbono. No momento 2, o plantio direto (PD) e manejo convencional (MC) foram iguais estatisticamente a M3 e superior a M1. Ainda em M2, todas as variáveis foram inferiores a M3 e iguais a M1 para o preparo de solo ESC.

Fracionamento da matéria orgânica do solo (0-20 cm) por sistema e momento

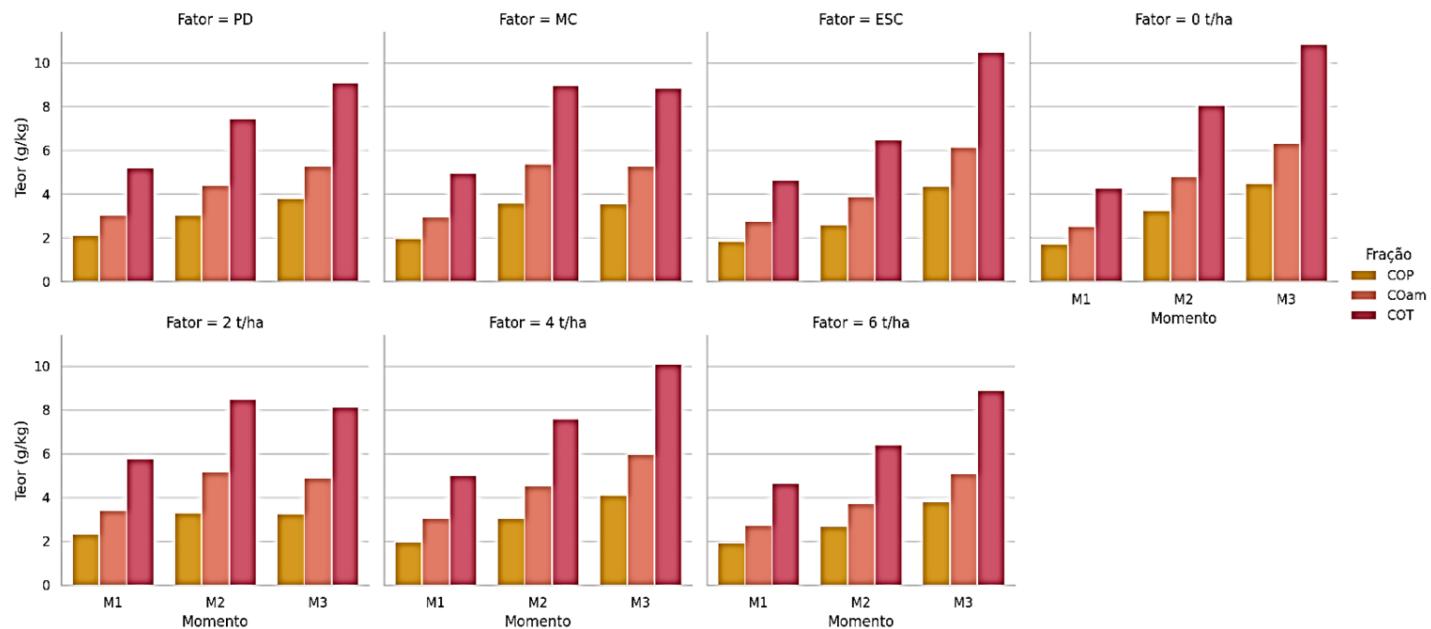


Figura 17: Valores de médias de fracionamento da matéria orgânica em função de preparos de solo e doses de calcário em três momentos na profundidade de 0-20 cm. Humaitá, AM. 2025.

Avaliando o efeito de doses de calcário dentro do fator momento, nota-se que não houve diferenças significativas entre doses de calcário em todos os momentos para todas as variáveis. Por outro lado, avaliando o fator momento dentro de doses de calcário, nota-se diferenças significativas com medias do M3 em todas as doses e M2 nas doses 0 e 2t/ha superiores a M1, com exceção da dose 2 t/ha que apresentou medias iguais nos três momentos.

Avaliando o efeito principal do fator momento a variável carbono orgânico particulado (COP) apresentou valores superiores em M3 quando comparo a M2 e M1, já o momento 2 foi superior a M1. O carbono orgânico associado a minerais (COam), o momento 3 apresentou valores iguais a M2, porém ambos superiores a M1. O carbono orgânico total (COT) é possível observar que o momento 2 foi superior a M1 e inferior a M3.

Na figura 18, estão os dados de carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado a minerais (COam) e carbono orgânico total (COT) em função de preparos de solo e doses de calcário em três momentos na profundidade 20-40 cm. Avaliando o efeito do fator preparo de solo dentro do fator momento e vice-versa, observa-se que não houve diferenças significativas entre os preparos de solo nos três momentos para todas as variáveis avaliadas, além disso, não houve diferenças significativas entre os três momentos em todos os preparos de solo, para todas as variáveis.

Avaliando o efeito de doses de calcário, observa-se que não houve diferenças significativas entre as doses de calcário, nos três momentos e para as variáveis carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado a minerais (COam) e carbono orgânico total (COT). Avaliando o fator momento, nota-se diferenças significativas entre momentos para a variável COP, os maiores valores observados foram no momento 3 que foi superior a M2 e M1. Para a variável COam, o momento 2 foi maior que o M3. Avaliando a variável COT, todas as doses foram iguais nos três momentos avaliados.

Avaliando o efeito principal do fator momento nota-se diferenças significativas para a variável carbono orgânico particulado (COP), o momento 3 igual ao momento 2 e superior ao momento 1. A variável COam, foi superior no momento 2 em relação ao momento 3. Já a variável carbono orgânico total (COT) tiveram resultados médios iguais nos três momentos.

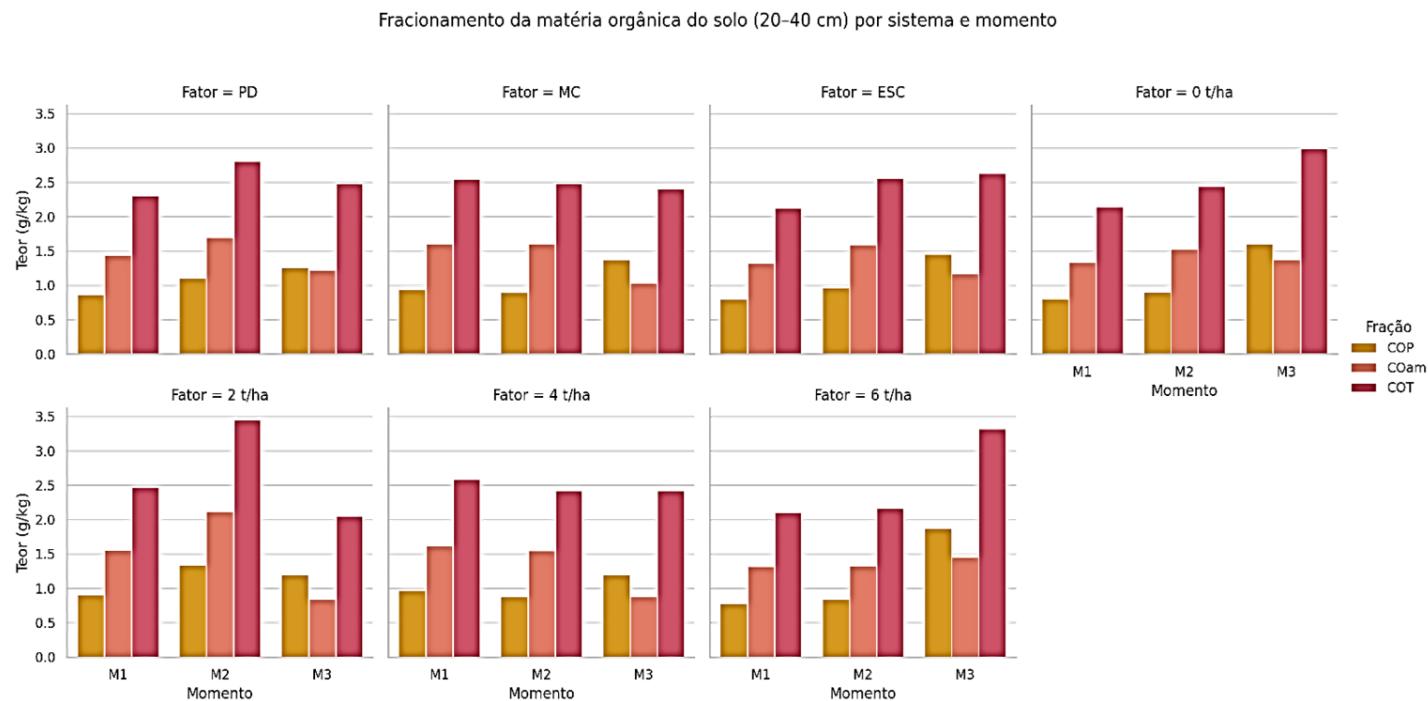


Figura 18: Valores de médias de fracionamento da matéria orgânica em função de preparos de solo e doses de calcário em três momentos na profundidade de 20-40 cm. Humaitá, AM. 2025.

Na figura 19, estão os dados de carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado a minerais (COam) e carbono orgânico total (COT) em função de preparos de solo e doses de calcário em três momentos na profundidade 40-60 cm. Avaliando o efeito de preparo de solo dentro do fator momento, observa-se diferenças significativas ($p<0,05$) entre preparo de solo apenas no momento 2, em que o preparo de solo com escarificador foi superior ao preparo de solo convencional e esse, com valores muito próximos ao plantio direto para carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado a minerais (COam) e carbono orgânico total (COT). Avaliando o fator momento dentro de preparo de solo é possível observar que M1 e M2 foram superiores a M3 em todos os preparos de solo para todas as variáveis avaliadas.

Fracionamento da matéria orgânica do solo (40-60 cm) por sistema e momento

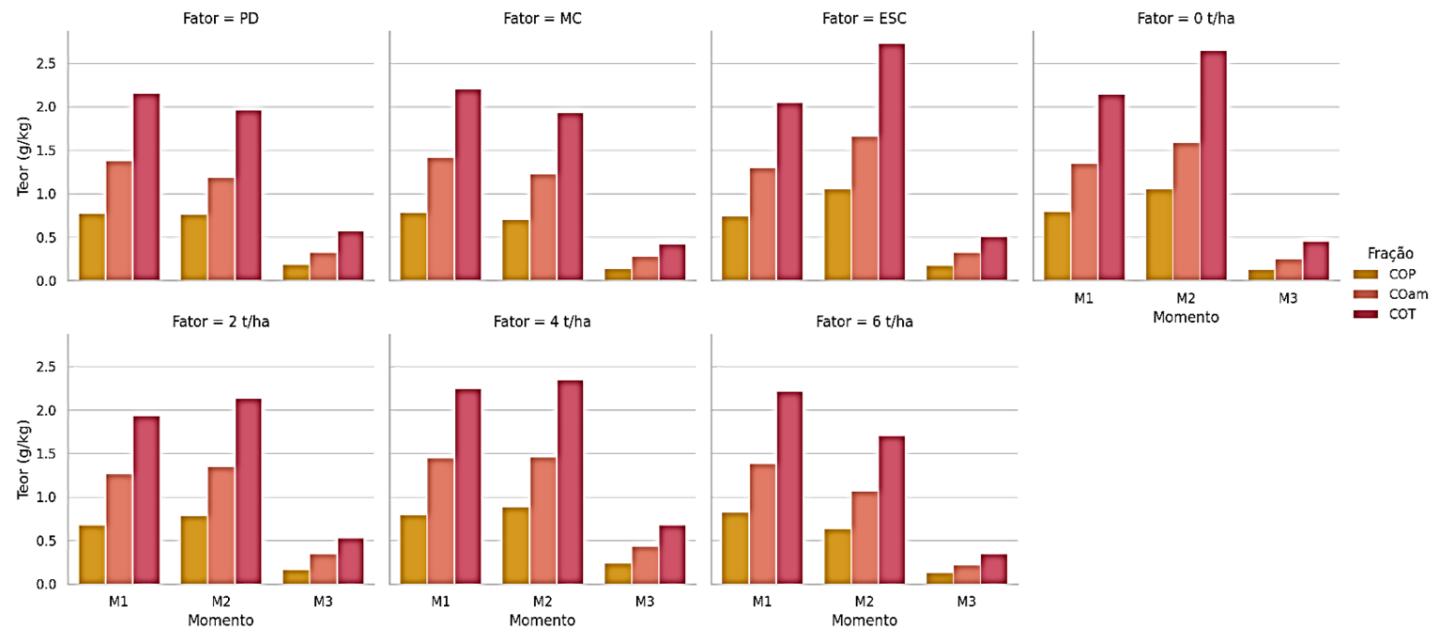


Figura 19: Valores de médias de fracionamento de matéria orgânica em função de preparamos de solo e doses de calcário em três momentos na profundidade de 40-60 cm. Humaitá, AM. 2025.

Avaliando o efeito de doses de calcário dentro do fator momento, com exceção do momento 2 para a variável carbono orgânico particulado (COP) em que se observa a dose 0 t/ha superior a dose 6 t/ha, todas as doses foram iguais entre si ($p>0,05$) nos três momentos avaliados em todas as variáveis. Avaliando o fator momento dentro de doses de calcário, nota-se que os momentos 1 e 2 foram superiores ao momento 3, em todas as variáveis e para todas as doses aplicadas, esse resultado também foi observado avaliando o fator principal do fator momento.

4.5 Decomposição da Brachiaria e T½ do Carbono

A decomposição da palhada Brachiaria Marandu foi acompanhada ao longo de 30 dias após o manejo, e os dados de fitomassa remanescente foram ajustados por regressão linear. A equação resultante do modelo foi:

$$Y = -231,88x + 10025y \quad (7)$$

com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9269$, indicando um elevado grau de ajuste entre os dados observados e o tempo de decomposição (Figura 20). A equação representa uma taxa média de perda de 231,88 kg/ha por dia, partindo de aproximadamente 10.025 kg/ha no tempo zero.

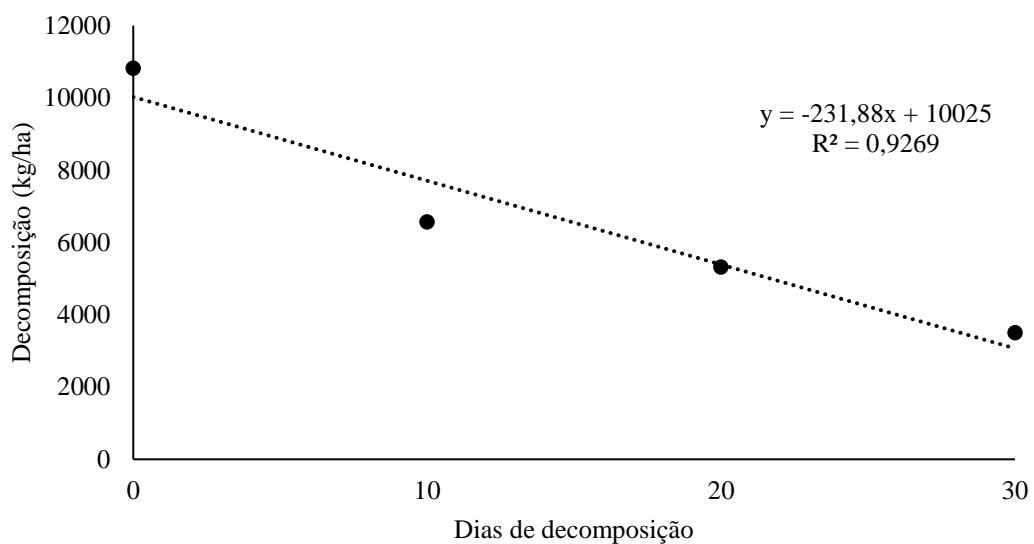


Figura 20: Taxa de decomposição de Brachiaria avaliadas a cada 10 dias no município de Humaitá, AM.

Com base no modelo linear ajustado, estimou-se que após 30 dias restaram aproximadamente 3.068,6 kg/ha de palhada no solo. Considerando o comportamento exponencial típico dos processos de decomposição da matéria orgânica, foi possível estimar a constante de decomposição K e o tempo de meia-vida $T_{1/2}$ da palhada.

A constante K foi calculada a partir da equação:

$$K = \frac{\ln\left(\frac{y}{y_0}\right)}{t} \Rightarrow K = \frac{\ln\left(\frac{3068,6}{10025}\right)}{30} \approx 0,0395 \text{ dia}^{-1} \quad (8)$$

A partir desse valor, obteve-se um tempo de meia-vida de:

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k} = \frac{0,6931}{0,0395} \approx 17,55 \text{ dias.} \quad (9)$$

Isso significa que, sob as condições do experimento, aproximadamente metade da massa da palhada foi decomposta em cerca de 17 dias. Esse tempo é coerente com estudos realizados em ambientes tropicais úmidos, onde a elevada temperatura e umidade favorecem a atividade microbiana e aceleram a decomposição da matéria orgânica.

A rápida decomposição observada é compatível com os resultados obtidos para os atributos físicos e o fracionamento da matéria orgânica do solo, que indicaram melhorias estruturais e aumento do COT ao longo dos momentos avaliados, principalmente nos sistemas com calagem associada ao plantio direto. A redução da palhada também impacta diretamente na proteção do solo e na ciclagem de nutrientes, destacando a importância do manejo adequado da cobertura vegetal entre cultivos, especialmente em sistemas agrícolas intensivos.

5 DISCUSSÃO

A análise dos atributos Físico-Hídrico revelou influência significativa do fator tempo (momento), destacando alterações nos valores de densidade do solo (DS), porosidade total (PT), macro e microporosidade, resistência à penetração (RP) e umidade. Tais variações indicam a dinâmica desses atributos ao longo dos cultivos, provavelmente influenciada pela interferência mecânica dos manejos e pelo ciclo das culturas implantadas. Essas mudanças estruturais no solo afetam diretamente a formação e a estabilidade dos agregados, que são essenciais para a proteção física da matéria orgânica,

principalmente do carbono orgânico particulado (COP), mais sensível às variações no ambiente edáfico (Rocha & Rezende, 2017; Oliveira et al., 2016).

Além disso, variações em porosidade e umidade impactam a atividade microbiana e a taxa de decomposição da matéria orgânica, interferindo na mineralização do carbono e, por consequência, nos teores de carbono orgânico total (COT) e das frações mais estáveis, como o carbono orgânico associado aos minerais (COam) (De Oliveira et al., 2024). Essa oscilação nos atributos físicos também foi evidenciada por Calonego et al. (2011), que relataram flutuações em propriedades físicas em função da sucessão de culturas e do manejo do solo, especialmente em sistemas conservacionistas como o plantio direto. Dessa forma, o acompanhamento da evolução desses atributos ao longo do tempo é fundamental para entender a capacidade do solo em armazenar carbono e sustentar agregados estáveis em ambientes tropicais.

Os atributos físicos do solo apresentaram variações relevantes ao longo dos momentos avaliados, revelando a sensibilidade do solo às práticas de manejo em curto prazo. A densidade do solo (DS) mostrou-se consistentemente menor nos tratamentos com escarificação, principalmente na camada de 20-40 cm, o que evidencia o efeito residual do revolvimento mecânico em promover a descompactação do solo. Esse efeito é coerente com os achados de Agne e Klein (2014), que destacam a escarificação como prática eficaz na redução da resistência mecânica à penetração das raízes, ao menos temporariamente. Contudo, observou-se tendência de aumento da densidade com o passar dos cultivos, possivelmente associada ao tráfego de máquinas agrícolas e à redução da cobertura superficial (ASSUNÇÃO et al., 2019; MACHADO et al., 2021). Isso reforça a importância de aliar o preparo mecânico a práticas que mantenham a cobertura vegetal do solo, como o uso de culturas de cobertura permanentes, para evitar a recompactação ao longo dos ciclos.

Os resultados médios de densidade do solo (DS) variaram de 1,29 a 1,86 Mg m⁻³, com os maiores valores concentrados nos tratamentos sob preparo convencional, especialmente nos momentos mais avançados (M2 e M3). Em algumas situações, esses valores ultrapassaram o limite crítico de 1,30 Mg m⁻³ para solos argilosos e siltosos, o que pode restringir o desenvolvimento radicular e reduzir a infiltração de água (De Moraes et al., 2020). Os sistemas com escarificação e plantio direto apresentaram menores densidades, especialmente nas camadas superficiais, refletindo a maior quantidade de matéria orgânica, menor revolvimento e efeito residual da descompactação inicial (Camilo-Cotrim et al., 2022).

A resistência à penetração (RP) acompanhou a tendência da densidade e da umidade do solo, com valores que oscilaram de 0,99 a 2,06 MPa. Os maiores valores foram observados no SPD no momento 3, possivelmente devido à menor umidade e à concentração de cargas superficiais, comuns em sistemas sem revolvimento intenso (Carlos Moura et al., 2019). Embora os valores estejam próximos do limite de 2,0 MPa considerado restritivo ao crescimento radicular (Tormena et al., 2002), não comprometeram diretamente a funcionalidade física do solo. A escarificação alcançou os menores valores de RP, confirmando seu efeito imediato na redução da compactação e melhorando a estrutura física do solo.

Essas variações na RP influenciam diretamente a capacidade do solo de acumular e proteger o carbono orgânico, uma vez que a compactação excessiva reduz o desenvolvimento radicular e a atividade microbiana, comprometendo o aporte de resíduos orgânicos ao solo (Augusto et al., 2022). Além disso, valores mais baixos de RP favorecem o crescimento radicular profundo, o que contribui para a formação de canais bioporosos e, consequentemente, para a estruturação do solo em agregados estáveis fenômeno observado em estudos sobre descompactação mecânica e biológica em latossolos compactados (De Almeida Mantelli et al., 2024). Como ressaltado por Macedo et al. (2010), a eficácia do preparo mecânico na melhoria da estrutura do solo tende a ser temporária, sendo essencial associá-lo a práticas que mantenham a cobertura vegetal. O sistema plantio direto (SPD), ao manter resíduos na superfície e promover a bioturbação ao longo dos ciclos, favorece tanto a redução da RP quanto a agregação e o sequestro de carbono no solo, tornando-se uma estratégia sustentável para os sistemas agrícolas tropicais (Souza et al., 2019).

A resistência à penetração (RP) foi maior no SPD em M3, o que pode estar relacionado à menor umidade do solo nesse período, já que há relação inversa entre teor de água e resistência mecânica (Tormena et al., 2002). Já a escarificação apresentou os menores valores de RP, coerentes com a maior porosidade e teor de umidade observados, o que confirma sua eficiência na descompactação inicial (Mendes, 2024). No entanto, esse efeito tende a ser temporário se não for associado a práticas que promovam cobertura vegetal e reduzam o tráfego de máquinas (Reis & Portella, 2024). A manutenção da umidade é, portanto, um indicador relevante da resiliência do solo frente às práticas de manejo, e sua interação com atributos estruturais, como porosidade e estabilidade de agregados, reforça a importância de manejos integrados e adaptados às condições edafoclimáticas regionais (Camilo-Cotrim et al., 2022; Souza et al., 2022).

A porosidade total (PT) e suas frações refletiram os efeitos do manejo e do tempo, com valores médios variando entre 0,41 e 0,65 m³ m⁻³, sendo os maiores observados nos tratamentos com SPD e escarificação, principalmente nos momentos iniciais. Esses resultados indicam melhor condição física do solo, com maior capacidade de retenção de água e ar, o que favorece o desenvolvimento radicular e a atividade microbiológica (Machado et al., 2021). A macroporosidade, porém, apresentou valores inferiores a 0,15 m³ m⁻³ em alguns tratamentos, sugerindo limitação à aeração, especialmente em solos mais compactados ou com menor cobertura vegetal (Pereira et al., 2021). Já a microporosidade foi favorecida nos sistemas com maior acúmulo de resíduos na superfície, mantendo-se em níveis satisfatórios (até 0,56 m³ m⁻³), reforçando o papel da matéria orgânica na estabilidade da estrutura do solo.

A redução progressiva da PT ao longo dos momentos avaliados levanta uma limitação importante sobre mesmo que manejos considerados conservacionistas podem não garantir a preservação da estrutura física quando não há cobertura vegetal contínua ou quando o sistema ainda está em fase de transição (Lauro, 2021). A diminuição da PT compromete diretamente a formação e a estabilidade dos agregados, reduzindo a proteção física da matéria orgânica e, por consequência, o acúmulo de carbono nas frações mais estáveis (Bernardi et al., 2023). Solos menos porosos também apresentam maior resistência à penetração e menor oxigenação, o que limita o aporte e a transformação do carbono particulado (COP) em formas mais recalcitrantes, como o carbono associado aos minerais (COam), interferindo na eficiência do sequestro de carbono a longo prazo (Duarte et al., 2020).

Esse cenário reforça a importância de adotar manejos integrados e contínuos, capazes de promover simultaneamente a melhoria da estrutura física e o sequestro de carbono no solo, especialmente em ambientes tropicais sujeitos à degradação. A inserção de espécies de cobertura com elevado potencial de formação de agregados, como leguminosas perenes, bem como a rotação de culturas, pode contribuir para o aumento da biomassa radicular, da atividade microbiana e da proteção física da matéria orgânica (De Abreu, 2025). Tais estratégias são particularmente relevantes em solos com textura siltosa, como os deste estudo, que apresentam maior vulnerabilidade à compactação e à desestruturação (Embrapa, 2017). Pesquisas futuras devem considerar esses fatores, além de incluir avaliações multianuais que possibilitem compreender a evolução das frações de carbono em resposta ao uso e manejo do solo.

A estabilidade dos agregados, expressa pelo DMP e DMG, apresentou resposta positiva à calagem e aos sistemas conservacionistas, sobretudo na camada de 0-20 cm. Os maiores valores de DMP foram observados sob escarificação (6,47 mm) e plantio direto (6,44 mm) com 6 t ha⁻¹ de calcário, indicando maior resistência à desagregação e estrutura mais consolidada. Esses resultados estão de acordo com Costa Ataides et al. (2022), que destacam o papel do cálcio na floculação das partículas e na formação de agregados mais estáveis. De forma semelhante, Zandoná et al. (2015) relatam que resíduos vegetais na superfície e maior atividade microbiana promovem a cimentação das partículas, o que reforça a estabilidade estrutural. A tendência de aumento do DMP ao longo do tempo nos manejos conservacionistas observada neste estudo confirma os achados de Maia et al. (2015), que apontam a melhoria gradual da estrutura como fator chave para a proteção e estabilização do carbono no solo.

A menor estabilidade estrutural observada no preparo convencional evidencia a limitação desses sistemas quanto à capacidade de proteger a matéria orgânica do solo, comprometendo o acúmulo e a estabilização do carbono (Assunção et al., 2019). Em contraste, os manejos conservacionistas, como o sistema plantio direto e a escarificação, favoreceram a formação de agregados mais estáveis, o que contribui para a proteção física da matéria orgânica e cria um ambiente mais propício ao desenvolvimento da biota do solo (Lambais et al., 2021). A presença de resíduos vegetais na superfície e o menor revolvimento contribuem para a incorporação gradual da matéria orgânica, especialmente quando aliados à calagem, que melhora a estrutura e favorece processos biológicos importantes ao sequestro de carbono (Souza et al., 2019). Dessa forma, a estrutura do solo atua como elemento ativo na dinâmica do carbono, e não apenas como indicativo físico, reforçando o papel dos manejos conservacionistas na mitigação das perdas de C e na sustentabilidade de agroecossistemas tropicais (Silva et al., 2022).

A dinâmica do carbono orgânico total (COT) no solo refletiu a influência do tempo e, em menor escala, dos manejos e doses de calcário. Embora não tenha havido diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos, observou-se uma tendência clara de acúmulo de carbono ao longo dos momentos avaliados, sobretudo na camada de 0-20 cm. O momento 3 (M3) concentrou os maiores valores médios de COT, com até 10,85 g kg⁻¹, enquanto no momento 1 (M1) os valores foram inferiores, alcançando apenas 4,28 g kg⁻¹ em alguns tratamentos. Essa diferença demonstra que a dinâmica do carbono em solos tropicais é sensível à cobertura vegetal e à atividade microbiológica, ainda que de forma moderada em curtos períodos (Cunha et al., 2017).

A elevação do COT em SPD e escarificação reforça a importância de sistemas que minimizam o revolvimento e mantêm resíduos na superfície, retardando a decomposição da matéria orgânica e favorecendo o acúmulo de carbono (Ferreira, 2013). Resultados semelhantes foram encontrados por Conceição et al. (2014) e Loss et al. (2017), que relataram aumento progressivo dos teores de carbono em sistemas conservacionistas, principalmente a partir do segundo ou terceiro ciclo agrícola.

É importante destacar que, mesmo na ausência de respostas significativas às doses de calcário, tratamentos com 2 e 4 t ha⁻¹ apresentaram, de forma geral, os maiores teores de COT, sugerindo que a correção parcial da acidez do solo pode ter criado condições mais favoráveis para a atividade microbiana e para a estabilização gradual do carbono orgânico no solo Bayer et al. (2011). Embora o manejo do pH afete indiretamente o acúmulo de carbono, estudos como os de Caires et al. (2000) mostram que o impacto da calagem sobre o COT é mais perceptível em longo prazo, quando o equilíbrio entre mineralização e estabilização da matéria orgânica se consolida.

O fracionamento da matéria orgânica revelou padrões complementares aos observados no COT. A fração particulada (COP), considerada mais lável e sensível a alterações no uso da terra, apresentou incremento progressivo ao longo dos momentos. Os maiores valores médios foram registrados no momento 3, atingindo até 4,35 g kg⁻¹ em sistemas escarificados, indicando maior acúmulo de carbono recente proveniente da decomposição de resíduos vegetais. O incremento do COP, sobretudo nos sistemas escarificados e sob doses intermediárias de calcário, reforça seu papel como indicador sensível às práticas de manejo, evidenciando a entrada recente de resíduos vegetais e sua decomposição parcial (Assunção et al., 2019). Essa resposta está de acordo com os achados de Aguiar et al. (2013) e Nanzer et al. (2019), que identificaram o aumento do COP como um dos primeiros sinais positivos da adoção de sistemas conservacionistas, onde, por sua natureza instável, o COP tende a ser mais influenciado pela cobertura do solo, pelo aporte de resíduos e pela intensidade do revolvimento.

Já o carbono orgânico associado aos minerais (COam), fração mais estável da matéria orgânica, mostrou menor variação entre os tratamentos e momentos, seus valores permaneceram relativamente constantes, com leve aumento no momento 2, especialmente nos tratamentos com SPD e nas doses intermediárias de calcário. A estabilização do carbono em formas minerais está diretamente relacionada à proteção física contra a decomposição, favorecida por interações com partículas finas e óxidos de ferro e alumínio (Zhao et al., 2023). No entanto, em solos com alta proporção de silte,

como os deste estudo, a formação dessas associações pode ser limitada, o que justifica a menor resposta da fração COam (Rocha & Rezende, 2017; Oliveira et al., 2016). A rápida decomposição da palhada de Brachiaria Marandu contribuiu diretamente para o aumento do carbono particulado (COP), o qual é precursor das frações mais estáveis da MOS, como o COam, evidenciando a importância da entrada contínua de resíduos para a sustentabilidade do sistema. Segundo Cambardella & Elliott (1992), a evolução da matéria orgânica do solo se dá inicialmente pela acumulação de COP, seguido pela sua transformação em formas mais estáveis, como o COam, processo que depende tanto da qualidade dos resíduos quanto das propriedades físico-químicas do solo.

Assim, os resultados indicam que, mesmo em curto prazo, o SPD e a escarificação promoveram maior acúmulo de carbono lável, refletindo a eficácia dessas práticas em conservar e incorporar matéria orgânica. No entanto, a ausência de uma área de referência sob vegetação nativa e o tempo limitado de condução do experimento limitam conclusões mais abrangentes sobre a estabilização do carbono em longo prazo. Pesquisas futuras devem considerar a inclusão de sistemas de referência, abordagens isotópicas para rastrear a origem do carbono, além de avaliações multianuais, que permitam entender a trajetória do carbono no solo em função do uso e manejo.

Vale destacar como limitação deste estudo, o tempo relativamente curto de avaliação (três momentos em dois ciclos agrícolas), o que restringe a observação de efeitos mais expressivos sobre estoques de carbono e melhorias estruturais mais duradouras. Além disso, os resultados obtidos neste estudo reforçam a importância da adoção de manejos conservacionistas como estratégia para promover a estabilidade dos agregados e a acumulação de carbono no solo. A interação entre o tipo de preparo e as doses de calagem demonstrou que é possível melhorar as condições físicas e químicas do solo, contribuindo para a construção de um ambiente mais favorável ao sequestro de carbono e à resiliência dos agroecossistemas amazônicos. Sistemas conservacionistas demonstraram maior capacidade de resposta estrutural mesmo em curto prazo, o que indica maior resiliência frente às alterações impostas pelo uso agrícola.

Por fim, destaca-se a necessidade de estudos de longo prazo para monitorar a dinâmica do carbono no solo e avaliar a estabilidade das frações ao longo dos ciclos agrícolas. A compreensão desses processos é essencial para definir estratégias de manejo que conciliem produtividade e conservação dos recursos naturais, sobretudo na região Sul do Amazonas, onde a expansão da agricultura tem alterado intensamente o uso da terra.

6 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou que os sistemas de manejo conservacionistas, notadamente o plantio direto e a escarificação, aliados à aplicação de calcário, resultaram em melhorias significativas nos atributos físicos do solo na camada de 0-20 cm. Houve aumento da estabilidade dos agregados (DMP e DMG), redução da densidade do solo e incremento da porosidade total, favorecendo a infiltração de água e o desenvolvimento radicular.

Quanto à dinâmica do carbono, observou-se acúmulo significativo de carbono orgânico total (COT) nos sistemas conservacionistas, impulsionado pela rápida decomposição dos resíduos de Brachiaria, o que resultou em aumento da fração lábil (COP) e estímulo à atividade microbiana. O fracionamento indicou acúmulo predominante de COP e incremento de COam com doses intermediárias de calcário, sugerindo a transição de formas lábeis para compartimentos mais estáveis da matéria orgânica.

Apesar da ausência de uma área de vegetação nativa como referência e do tempo limitado de avaliação, os resultados reforçam o potencial das práticas conservacionistas na melhoria da qualidade do solo e na sustentabilidade agrícola. Tais práticas se mostram particularmente estratégicas para regiões como o sul do Amazonas, especialmente o município de Humaitá, onde a expansão da agricultura demanda manejos que conciliem produtividade com conservação dos recursos naturais.

7 REFERÊNCIAS

AGNE, Sandra A. A; KLEIN, Vilson A. Matéria orgânica e atributos físicos de um Latossolo Vermelho após aplicações de dejeto de suínos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 720-726, 2014.

AGUIAR, Alana das Chagas Ferreira et al. Organic matter fraction and pools of phosphorus as indicators of the impact of land use in the Amazonian periphery. **Ecological indicators**, v. 30, p. 158-164, 2013.

ARAÚJO, A. C. DE et al. Variabilidade temporal do efluxo de CO₂ do solo em ecossistema florestal na Amazônia oriental. **Ciência e Natura**, v. 45, n. esp. 2, p. e82194, 22 nov. 2023.

ASSUNÇÃO, Shirlei Almeida et al. Carbon input and the structural quality of soil organic matter as a function of agricultural management in a tropical climate region of Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 658, p. 901-911, 2019.

AUGUSTO, Marcus Vinicius Sauer et al. Preservação de recursos naturais através de práticas de manejo e seus impactos na qualidade física do solo. **UNICIÊNCIAS**, v. 26, n. 2, p. 108-119, 2022.

BAYER, Cimélio et al. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and tillage research**, v. 54, n. 1-2, p. 101-109, 2000a.

BAYER, Cimelio; MIELNICZUK, Joao; MARTIN-NETO, Ladislau. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 599-607, 2000b.

BAYER, Cimélio. Aumento do estoque de matéria orgânica de um Cambissolo Húmico catarinense sob plantio direto. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 2, n. 2, p. 81-87, 2003a.

BAYER, Cimélio et al. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. **Tópicos em ciência do solo**, v. 7, n. 5, p. 55-118, 2011.

BAYER, Cimélio et al. Incremento de carbono e nitrogênio num Latossolo pelo uso de plantas estivais para cobertura do solo. **Ciência Rural**, v. 33, p. 469-475, 2003b.

BAYER, Cimélio et al. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 677-683, 2004.

BENITES, Vinicius de Melo et al. Análise discriminante de solos sob diferentes usos em área de Mata Atlântica a partir de atributos da matéria orgânica. **Revista Árvore**, v. 34, p. 685-690, 2010.

BERNARDI, AC de C. et al. Manejo conservacionista da matéria orgânica do solo: sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. 2023.

BETTIOL, Wagner et al. Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. Brasília, DF: Embrapa, 2023.

BLAIR G J, et al. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural system. **Aust J Agr Res**, v. 46, p. 1459-1466, 1995.

CARLOS MOURA, Jean; BORGES BARBOSA, Márcia Aparecida; Strazeio Cardoso, Saulo. Interferência da compactação do solo no manejo de altas produtividades na cultura da soja. Nucleus (16786602), v. 16, n. 1, 2019.

CAIRES, E. F.; BANZATTO, D. A.; FONSECA, AF da. Calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 161-169, 2000).

CALONEGO, J.C.; BORGHI, E.; CRUSCIOL, C.A.C. Intervalo hídrico ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e braquiária. **Rev. Bras. Cienc. Solo** 2011, 35, 2183–2190

CAMBARDELLA, Cynthia A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil science society of America journal**, v. 56, n. 3, p. 777-783, 1992.

CAMILO-COTRIM, Carlos Filipe et al. QUALIDADE DO SOLO: RELEVÂNCIA E USO DE INDICADORES PARA O MONITORAMENTO. *Revista Agrotecnologia-Agrotec*, v. 13, n. 2, p. 46-65, 2022.

CAMPANHA, M. M.; NOGUEIRA, R. da S.; OLIVEIRA, T. S. de; TEIXEIRA, A. dos S.; ROMERO, R. E. Teores e estoques de carbono no solo de sistemas agroflorestais e tradicionais no semiárido brasileiro. Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos, 2009. 13 p. (Embrapa Caprinos e Ovinos. Circular técnica, 42).

CAMPOS, M. C. C. et al. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **REVISTA AGRO@MBIENTE ON-LINE**, v. 6, n. 2, p. 102–109, 31 ago. 2012.

CLEMENTE, Eliane de Paula et al. Fracionamento da matéria orgânica dos solos da Ilha da Trindade, Atlântico Sul. **Revista do Departamento de Geografia**, 2018.

CONCEIÇÃO, Paulo Cesar et al. Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. **Ciência Rural**. 44:794-800, 2014.

CONCEIÇÃO, Paulo Cesar et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 29, p. 777-788, 2005.

COSTA, A. A. et al. Carbon and nitrogen stocks in soils under different forms of use in the cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 8, p. 528–533, 1 ago. 2020.

COSTA ATAIDES, Geilton et al. Variação espacial dos atributos físicos e estoques de carbono do solo em plantio de *Schizolobium amazonicum* na Amazônia. **Nativa**, v. 10, n. 4, 2022.

COSTA et. al, Aumento de matéria orgânica num latossolo bruno em plantio direto. Ciência Rural, Santa Maria, v.34, n.2, p.587-589, 2004.

COSTA, N. R. et al. Soil properties and carbon accumulation in an integrated crop-livestock system under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 3, p. 852–863, 1 maio 2015.

COSTA, Higor Dall'Agnol et al. AVALIAÇÃO DE ADUBAÇÃO QUÍMICA E ORGÂNICA NO CULTIVO DO MILHO. **Revista GeTeC**, v. 15, 2024.

CRESPO, Cristiane Maria Gonçalves et al. Estoques de carbono do solo e nas frações lâbeis da matéria orgânica sob sistema agroflorestal em brejo de altitude pernambucano. **Ciência Florestal**, v. 32, p. 2180-2198, 2023.

CUNHA, José Maurício da et al. Atributos físicos e estoque de carbono do solo em áreas de Terra Preta Arqueológica da Amazônia. *Revista Ambiente & Água*, v. 12, p. 263-281, 2017.

DA LUZ SILVA, Larissa; RIBON, Adriana Aparecida; BACKES, Clarice. Carbono e matéria orgânica do solo em sistema de manejo de produção de pastagem: uma revisão sistemática com meta-análise. *Agrarian*, v. 16, n. 56, p. e17176-e17176, 2023.

DE ABREU, Jorge Ritter. **Gestão da Matéria Orgânica do Solo: Dinâmica, Indicadores e Manejos**. Viseu, 2025.

DE ALMEIDA MANTELLI, Fernando et al. DESCOMPACTAÇÃO MECÂNICA E BIOLÓGICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO COMPACTADO: INFLUÊNCIA NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOLO. *Global Science & Technology*, v. 16, n. 1, 2024.

DE MORAES, Moacir Tuzzin; DE ANDRADE BONETTI, João; CHERUBIN, Maurício Roberto. Relações da água com parâmetros físicos e crescimento radicular das plantas. Manejo e conservação da água e do solo, p. 39, 2020.

DE OLIVEIRA, Ivanildo Amorim et al. Geoestatística Aplicada a Atributos Físicos e Químicos em Área com Mandioca na Região de Humaitá, Amazonas. *Fronteira: Journal of Social, Technological and Environmental Science*, v. 13, n. 2, p. 35-49, 2024.

DIECKOW, J. et al. **Sistemas Conservacionistas de Preparo do Solo e Implicações no Ciclo do Carbono**. São Carlos: Embrapa, 2004. 18p.

DONG, Lingbo et al. A florestação proporciona resultados significativamente mais eficazes nos sequestros de C e N do solo do que a sucessão natural em áreas gravemente degradadas: Evidência do caso do Planalto Central de Loess. *Catena*, v. 208, pág. 105734, 2022.

DO AMARAL, V. DE A.; PEREIRA, N. S.; CHAVES, A. F. Estimativa do teor de matéria orgânica do solo a partir de valores RGB de imagens de amostras de solos da região do baixo Jaguaribe, Ceará, Brasil¹. **DELOS: DESARROLLO LOCAL SOSTENIBLE**, v. 16, n. 42, p. 325–341, 17 mar. 2023.

DUARTE, T. F.; SILVA, T. J. A.; BONFIM-SILVA, E. M.; FENNER, W. Resistance of a red latosol to penetration: Comparison of penetrometers, model adjustment, and soil water content correction. *Engenharia Agrícola*, v. 40, n. 4, p. 462-472, 2020. <https://doi.org/10.1590/1809-4430 Eng. Agric.v40n4p462-472/2020>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: 1999. 412p.

FERREIRA, E. A. Dinâmica de longo prazo do carbono do solo em sistema de manejo no cerrado. Universidade de Brasília, Instituto de Ciências Biológicas, Programa de Pós Graduação em Ecologia, (Tese de doutorado) p.235, 2013.

FRANCINE, N. C. et al. Biomass and nutrition stock of grassland and accumulated litter in a silvopastoral system with Cerrado species. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 38, p. 3701–3709, 22 set. 2016.

GAZOLLA, PR et al. 2015. Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. Semina: Ciências Agrárias 36: 693-704

GOMES, Lucas Carvalho et al. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. **Geoderma**, v. 340, p. 337-350, 2019.

GONÇALVES, R. et al. Determinação da matéria orgânica do solo com dois métodos distintos em pomares de pessegueiros da região da Beira Interior, Portugal Soil organic matter evaluation using two different methods in peach orchards from the Beira Interior-Portuguese centre region R E S U M O. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 2022, n. 4, p. 321–323.

GONG, C. et al. O desbaste florestal aumenta os estoques de carbono no solo na China. **Ecologia e Manejo Florestal**, v. 482, p. 118812, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118812>

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. Bulk density and linear extensibility. In: Dane, J.H. & Topp, C., eds. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison, Soil Science of Society of America. 2002, p. 201-228.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. (2022). Estimativas da população. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/am/humaita/panorama>>. Acesso em: 26 de maio de 2024.

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, forestry and other land use. Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), v.4, 2006.

IPCC - Mudanças Climáticas. 2014. "Relatório de Síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas" [Equipe Central de Redação, RK Pachauri e LA Meyer (eds.)]. IPCC, Genebra, Suíça.

JUNIOR, Carlos Roberto Pinheiro et al. Fertilidade do solo e dinâmica da matéria orgânica em áreas no perímetro irrigado Jaguaribe-Apodi, CE. **Agropecuária Científica No Semiárido**, v. 17, n. 1, p. 1-6, 2021.

KEMPER, W. D.; CEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. **Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling**, v. 9, p. 499-510, 1965.

KIEHL, Edmar José. **Manual de edafologia: relação solo planta**. Agronômica Ceres, 1979.

LAL, Rattan. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **science**, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004.

LAMBAIS, É. O. et al. Atividade microbiana e carbono orgânico do solo em agroecossistemas sob diferentes manejos no semiárido paraibano. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 8, p. 412-427, 22 ago. 2021.

LAURO, Márcio Fernando Barbosa. Propriedades físico-hídricas em áreas sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola no Oeste da Bahia. 2021.

LENSE, G. H. E. et al. Modeling of Soil Organic Carbon Loss by Water Erosion on a Tropical Watershed. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 52, n. 1, p. 1-8, 2021.

LAURO, Márcio Fernando Barbosa. Propriedades físico-hídricas em áreas sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola no Oeste da Bahia. 2021.

LIU, Xiang et al. Changes in soil labile and recalcitrant carbon pools after land-use change in a semi-arid agro-pastoral ecotone in Central Asia. **Ecological Indicators**, v. 110, p. 105925, 2020.

LOSS, Arcângelo et al. Atributos físicos do solo em cultivo de cebola sob sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas**, v. 11, n. 1, p. 105-113, 2017.

LOURENTE, Elaine Reis Pinheiro, et al. "Rotação de culturas e relações com atributos químicos e microbiológicos do solo e produtividade do milho." (2010).

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 175-187, 2004.

MACEDO, Vera RM; DA SILVA, Apolino JN; CABEDA, Mário SV. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho fisicamente degradado e recuperado. **Revista Brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 14, p. 812-818, 2010.

MACHADO, Caio Bastos et al. Carbono orgânico do solo e componentes de produção do milho sob manejos do solo e sucessão de culturas na Amazônia Ocidental. In: EXTENSÃO RURAL: PRÁTICAS E PESQUISAS PARA O FORTALECIMENTO DA AGRICULTURA FAMILIAR-VOLUME 2. Editora Científica Digital, 2021. p. 154-168.

MAIA, CMB de F., and L. M. Parron. "Matéria orgânica como indicador da qualidade do solo e da prestação de serviços ambientais." (2015).

MARQUES, J. D. O. et al. Carbono orgânico em solos sob floresta na Amazônia Central. 2013.

MARTINS, Paulo André da Silva. Normais climatológicas, balanço hídrico e classificação climática para a mesorregião sul do amazonas. Orientador: Carlos

Alexandre Santos Querino. 2018. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente-Universidade Federal do Amazonas, Humaitá, 2019.

MENDES, Antonio Guaraná. Alterações nos atributos físicos de um latossolo amarelo associados ao sistema de manejo. 2024.

MORAES, M. T. et al. Propriedades físicas do solo sob diferentes níveis de compactação em um latossolo vermelho distroférreo. 2011.

NANZER, Marina Chiquito et al. Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 18, n. 1, p. 136-145, 2019.

NASCIMENTO, Paulo César do et al. Sistemas de manejo e a matéria orgânica de solo de várzea com cultivo de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1821-1827, 2009.

NOBRE, Carlos A.; NOBRE, Antônio D. O balanço de carbono da Amazônia brasileira. **Estudos avançados**, v. 16, p. 81-90, 2002.

NOBRE, Camila Pinheiro et al. Agregação, glomalina e carbono orgânico na chapada do Araripe, Ceará, Brasil. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 1, p. 138-147, 2015.

NOVAES FILHO, J. P et al. Distribuição espacial de carbono em solo sob floresta primária na Amazônia Meridional. **Revista Árvore**, v. 31, p. 83-92, 2007.

OHLAND, Tatiane; DO CARMO LANA, Maria; FRANDOLOSO, Jucenei Fernando. Fracionamento químico da matéria orgânica do solo após sistemas de manejo no inverno. **Scientia Agraria Paranaensis**, p. 53-64, 2019.

OLIVEIRA, B. O. S. DE et al. Avaliação dos solos e das águas nas áreas de influência de disposição de resíduos sólidos urbanos de Humaitá, Amazonas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, p. 593–601, 11 ago. 2016.

OLIVEIRA, Carlos MR et al. Corretivos da acidez do solo e níveis de umidade no desenvolvimento da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 1, p. 25-31, 2010.

OLIVEIRA, I. A. DE et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1103–1112, ago. 2013.

OLIVEIRA, Lucas et al. Manejo do solo como fonte de alteração na dinâmica do carbono orgânico. **ENCICLOPEDIA BIOSFERA**, v. 17, n. 31, 2020.

PEREIRA, Gustavo Eduardo et al. Propriedades físicas de solos sob diferentes sistemas de cultivo de soja em Vacaria, Rio Grande do Sul Physical properties of soils under different soybean cultivation systems in Vacaria, Rio Grande do Sul. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 55838-55850, 2021.

PEREIRA, Maria Francisca Soares et al. Ciclagem do carbono do solo nos sistemas de plantio direto e convencional. **Agropecuária científica no semiárido**, v. 9, n. 2, p. 21-32, 2013.

PRIMIERI, Silmar; MUNIZ, Aleksander Westphal; LISBOA, Henrique de Melo. Dinâmica do carbono no solo em ecossistemas nativos e plantações florestais em Santa Catarina. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.

QUESADA, CA et al. Variações nas propriedades químicas e físicas dos solos da floresta amazônica em relação à sua gênese. **Biogeociências**, v. 7, n. 5, pág. 1515-1541, 2010.

RANGEL, Otacílio José Passos et al. Soil organic carbon and total nitrogen as related with coffee spacing. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2051-2059, 2008.

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. 1, Viçosa, 2007. p. 49-134.

REIS, Diony Alves; PORTELLA, Roberto Bagattini. Atributos físico-hídricos de um latossolo cultivado com algodão sob plantio convencional e sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **International Contemporary Management Review**, v. 5, n. 3, p. e174-e174, 2024.

ROCHA, M. T.; REZENDE, L. R. DE. Estudo laboratorial de um solo tropical granular estabilizado quimicamente para fins de pavimentação. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, p. e, 2 out. 2017.

ROSA, Carla Machado da et al. Conteúdo de carbono orgânico em Planossolo Háplico sob sistemas de manejo do arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1769-1776, 2011.

SALES, Rafael Pereira et al. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 3, p. 429-438, 2016.

SALTON, Júlio Cesar et al. **Matéria orgânica do solo na integração lavoura-pecuária em Mato Grosso do Sul**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2005.

SANTOS, Daiane Carvalho dos et al. Fracionamento químico e físico da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Ciência Rural**, v. 43, p. 838-844, 2013.

SANTOS, V. S. **Ciclo do carbono**. 2013. Disponível em: <<https://brasilescola.uol.com.br/biologia/ciclo-carbono.htm>>. Acesso em: 21 de maio de 2024.

SCHNITZER, M. & MONREAL, C. M. Quo vadis soil organic matter research?: a biological link to the chemistry of humification. **Adv. Agron.**, v. 113, p. 139–213, 2011.

SIEFERT, Cesar Augusto Crovador; DOS SANTOS, Irani. Dinâmica do carbono orgânico e processos hidrológicos na escala da bacia hidrográfica: uma revisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 1, 2018.

SILVA, Jordhanna Marilia et al. Estimativa da macroporosidade e microporosidade em função de sistemas de manejo e plantas de cobertura em Latossolo Vermelho cultivado com soja. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, p. e54411326833-e54411326833, 2022.

SILVA, L. S. et al. Efluxo de carbono do solo na Floresta da Tijuca-Rio de Janeiro. 2023.

SILVA, Roseana Pereira da. Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus (AM). 2007.

SECRETTI, M. Aporte de Carbono ao Solo por Sistemas de Monocultura, Sucessão e Rotação de Culturas. Mato Grosso do Sul: Universidade Federal da Grande Dourados, 2017.

SOUZA, J. F. D. et al. Atributos físicos, matéria orgânica do solo e produção de Capim Marandu em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas**, v. 13, n. 1, p. 51-64, 2019.

SOUZA, Paulino Taveira de et al. Variabilidade espacial da biomassa e atividade microbiana do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. **Ciência Florestal**, v. 31, p. 1949-1967, 2022.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TORMENA, Cássio Antonio et al. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia agrícola**, v. 59, p. 795-801, 2002.

TOSTO, S. G. et al. Serviços ecossistêmicos e serviços ambientais de solo, água e carbono-Amazônia. 2023.

URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; JANTALIA, C. P.; BODDEY, R. M. Variações nos estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa em solos das regiões tropicais e subtropicais do Brasil: Uma análise crítica. **Inf. Agron.**, v. 130, p. 12-21, 2010.

VIEIRA, F. C. B. et al. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. **Soil and Tillage Research**, v. 96, n. 1-2, p. 195-204, 2007.

WANG, Xiaoyue et al. Organic amendments drive shifts in microbial community structure and keystone taxa which increase C mineralization across aggregate size classes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 153, p. 108062, 2021.

WHITE, Courtney. The story of carbon. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://courtneywhite.site/wp-content/uploads/2023/05/The-Story-of-Carbon.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2025.

YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communication Soil Science Plant*, v. 19, p. 1467-1476, 1988.

ZANDONÁ, R. R. et al. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 45, n. 2, p. 128–137, 2015.

ZHAO, Zhanhui et al. Acúmulo de carbono orgânico e formação de agregados em solos sob práticas de manejo de fertilizantes orgânicos e inorgânicos em um sistema de cultivo de arroz e trigo. **Relatórios Científicos**, v. 13, n. 1, pág. 3665, 2023.

ZUBELDIA, T. et al. Evaluacion de algunas propiedades físicas de un suelo del sudeste bonaerense bajo distintos sistemas de cultivo. **XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo**, 2018.