

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

LAURA SILVA NANTES

**SUBSOLO EXPOSTO EM RECUPERAÇÃO HÁ 30 ANOS: INFLUÊNCIA DE
ESTRATÉGIAS DE MANEJO SOB ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS**

Ilha Solteira - SP
2024



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

LAURA SILVA NANTES

**SUBSOLO EXPOSTO EM RECUPERAÇÃO HÁ 30 ANOS: INFLUÊNCIA DE
ESTRATÉGIAS DE MANEJO SOB ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Especialidade: Sistemas de Produção.

Prof^a. Dr^a. Carolina dos Santos Batista Bonini
Orientadora

Prof. Dr. Vitor Corrêa de Mattos Barretto
Coorientador

Ilha Solteira - SP

2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

Nantes, Laura Silva.
N192s Subsolo exposto em recuperação há 30 anos: influência de estratégias de
 manejo sob atributos físicos e químicos / Laura Silva Nantes. -- Ilha Solteira:
 [s.n.], 2024
 77 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2024

Orientador: Carolina dos Santos Batista Bonini
Coorientador: Vitor Corrêa de Mattos Barretto
Inclui bibliografia

1. Adubo verde. 2. Degradação do solo. 3. Planta de cobertura. 4. Matéria
orgânica do solo.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A pesquisa tem o potencial de ampliar conhecimentos na área de física e química do solo e contribuir na evolução de estratégias e escolhas de técnicas de recuperação do solo, propõe a utilização de técnicas de custo acessível e a diversificação de intervenções – mecânico (físico), químico e vegetação (biológico). Devido ao histórico do local (área de empréstimo decorrente da construção da Usina hidrelétrica de Ilha Solteira), a pesquisa visou sua recuperação para cumprir o uso social da terra, além da necessidade de preservação e restauração de solos do bioma Cerrado, devido à grande perda de biodiversidade por queimadas e desmatamento. Também propõe soluções sustentáveis e acessíveis para mitigar impactos negativos das mudanças climáticas atuais, através do ciclo de carbono e sua relação com o solo e vegetação. Também visou conscientizar profissionais da área agrícola sobre a importância de métodos de recuperação ecológicos e acessíveis.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The research has the potencial to expand knowledge in the fields of soil physics and chemistry and contribute to the development of strategies and the selection of soil recovery techniques. It proposes the use of cost-effective techniques and the diversification of interventions—mechanical (physical), chemical, and biological (vegetation). Given the historical context of the site (a borrow area resulting from the construction of the Ilha Solteira Hydroelectric Plant), the study aimed at its recovery to fulfill the social function of the land, alongside the need for preservation and restoration of soils in the Cerrado biome due to significant biodiversity loss caused by fires and deforestation. It also proposes sustainable and accessible solutions to mitigate the negative impacts of current climate change through the carbon cycle and its relationship with soil and vegetation. Additionally, it aimed to raise awareness among agricultural professionals about the importance of ecological and accessible.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SOLO DECAPITADO EM RECUPERAÇÃO HÁ 30 ANOS: INFLUÊNCIA DE ESTRATÉGIAS DE MANEJO SOB ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS

AUTORA: LAURA SILVA NANTES

ORIENTADORA: CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI

COORIENTADOR: VITOR CORRÊA DE MATTOS BARRETTO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Agronomia, especialidade: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI**
Data: 20/03/2025 09:44:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. CAROLINA DOS SANTOS BATISTA BONINI (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **PAULO RENATO MATOS LOPES**
Data: 20/03/2025 09:53:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. PAULO RENATO MATOS LOPES (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **CLAYTON LUIS BARAVELLI DE OLIVEIRA**
Data: 16/12/2024 18:34:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. CLAYTON LUÍS BARAVELLI DE OLIVEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Meio Ambiente / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP

Ilha Solteira, 16 de dezembro de 2024

Ao meu pai Geraldo Augusto Pinto Nantes e
minha mãe Rosângela da Silva Nantes, que me
educaram e não mediram esforços para tornar
possível essa conquista, todo meu amor,
respeito e admiração a eles.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processo 142637/2022-0.

Agradeço à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” que me proporcionou muito conhecimento e vivências e possibilitou meu crescimento profissional e pessoal ao longo da graduação e pós-graduação.

À minha orientadora Profa. Dra. Carolina dos Santos Batista Bonini, pela orientação, oportunidade e agregação de conhecimento nessa área tão importante que é a física do solo e recuperação de áreas degradadas.

Ao Grupo de Experimentação em Nutrição e Adubação de Plantas (GENAP) por todo o conhecimento e ajuda dos participantes em coletas e análises foi de grande importância para minha formação acadêmica e realização desse projeto.

Aos técnicos de campo e de laboratório, especialmente à Andréia da Silva Pepeliskof, que me auxiliou durante as análises químicas. Ao bibliotecário Fábio Rosas, que me orientou acerca das citações e referências bibliográficas.

Aos meus colegas e amigos: Melissa Alexandre Santos, Lucas da Silva Alves, Josiane Lourencetti, Jorge João Delfim, José Augusto Liberato, Gabriel Lunardelli, Dayara Vivian Alvares, Dienifer Alvares, Yasmin Alves da Cruz, Maurício Bruno Prado e Gabriela Freitas que participaram diretamente na realização do experimento. Sou muito grata a todo o apoio, ajuda, trabalho e momentos de alegria que me proporcionaram.

Aos Profs. Drs. Paulo Renato Matos Lopes, Clayton Clayton Luis Baravelli de Oliveira, Marlene Cristina Alves e Bruno Rafael de Almeida Moreira por aceitarem o convite de banca de defesa de dissertação, além do Prof. Dr. Reges Heinrichs e Jorge João Delfim por aceitarem ser banca de qualificação da dissertação.

Aos meus pais por sempre acreditarem em mim, me proporcionarem estudar em uma ótima universidade e me incentivarem ir atrás de meus objetivos e sonhos. Por terem me educado sempre com muito amor e carinho, com princípios e valores maravilhosos visando sempre o respeito a tudo e a todos. Por me ensinarem a ter responsabilidade e crescer um pouco a cada dia. Tenho muita admiração e respeito por ambos e me sinto muito honrada e privilegiada por ser filha de pessoas tão maravilhosas, amo muito vocês e lhes devo tudo que sou e conquistei, vocês sempre foram e continuam sendo minha base para caminhar e crescer.

À toda minha família que sempre foi muito unida e me incentiva e apoia a crescer e buscar meus objetivos.

Aos amigos que participaram de todos esses anos da minha vida acadêmica, tornando-a mais leve, alegre e divertida, me aconselhando e ajudando nos melhores e piores momentos.

RESUMO

O presente cenário de mudanças climáticas pede medidas para reverter e mitigar seus impactos negativos. No mundo existem muitas áreas degradadas que podem servir como sequestro e armazenamento de carbono (C) com sua recuperação. No Brasil, um dos motivos da degradação do solo é a formação de áreas de empréstimo formadas para construção de grandes obras de engenharia, como é o caso da construção de usinas hidrelétricas. O estudo teve como propósito avaliar o efeito residual de diferentes práticas de manejo em um solo decapitado desde 1969, em processo de recuperação há 30 anos. O solo em estudo é um Latossolo e sua avaliação foi realizada entre 2023 e 2024. O experimento incluiu nove tratamentos, com duas testemunhas: solo exposto (T1) e vegetação nativa (T2), e os demais, solo mobilizado (T3) e solos combinando adubos verdes (mucuna-preta – T4, feijão-guandu substituído por feijão-de-porco - T5), aplicação de calcário (T6 e T7) e calcário + gesso (T8 e T9) de 1992 até 1997. A partir de 1999 foi implantada *Urochloa decumbens* em todas as parcelas, e a partir de 2009 surgiram naturalmente espécies arbóreas nativas do cerrado. Foram avaliados os parâmetros: umidade gravimétrica, estabilidade de agregados, taxa de infiltração, densidade, resistência do solo à penetração, pH, acidez potencial, teor de P, K, Ca e Mg, soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), fracionamento físico da matéria orgânica, teor de matéria orgânica e estoque de C orgânico do solo. Os resultados foram submetidos ao teste F da análise de variância e comparando as médias dos tratamentos pelo teste de Scott-Knott utilizado o software SISVAR. Os tratamentos com mucuna e mucuna com calcário obtiveram os melhores resultados. As estratégias com mucuna tiveram um impacto positivo na qualidade do solo em áreas degradadas, com aumento da umidade, redução da resistência à penetração e da densidade do solo, além de melhora da estabilidade dos agregados. A mucuna com calcário melhorou aspectos químicos com pH, Ca, SB, V%, CO, e MOS e ECO. Isso destaca a importância da mucuna no manejo de recuperação do solo ao longo de 30 anos, especialmente em profundidades de 5-10 e 10-20 cm. O manejo de restauração com feijão guandu/feijão-de-porco, combinado com gessagem e calagem, demonstrou melhora em atributos como umidade gravimétrica, infiltração, densidade do solo, pH, Ca, Mg, K, SB, V% e MOS sugerindo ser uma opção promissora para a melhoria da estrutura do solo em comparação com outras estratégias contendo esses condicionadores do solo.

Palavras-chave: adubo verde; degradação do solo; planta de cobertura; matéria orgânica do solo.

ABSTRACT

The current scenario of climate change calls for measures to reverse and mitigate its negative impacts. Around the world, there are many degraded areas that, if restored, can serve as sites for carbon (C) sequestration and storage. In Brazil, one of the causes of soil degradation is the creation of borrow pits formed during the construction of large engineering projects, such as the hydroelectric plant. The study aimed to evaluate the residual effect of different management practices on a decapitated soil since 1969, which has been under recovery for 30 years. The soil under study is an Oxisol, and its assessment was conducted between 2023 and 2024. The experiment included nine treatments, with two control groups: exposed soil (T1) and native vegetation (T2). The other treatments involved mobilized soil (T3) and soils with green manure combinations (black mucuna – T4, pigeon pea replaced by jack bean – T5), the application of limestone (T6 and T7), and limestone + gypsum (T8 and T9) from 1992 to 1997. Starting in 1999, *Urochloa decumbens* was planted in all plots, and from 2009, native Cerrado tree species naturally emerged. The following parameters were evaluated: gravimetric moisture, aggregate stability, infiltration rate, bulk density, soil penetration resistance, pH, potential acidity, and the contents of P, K, Ca, and Mg, as well as sum of bases (SB), cation exchange capacity (CEC), base saturation percentage (V%), physical fractionation of organic matter, organic matter content, and soil organic carbon stock. The results were subjected to the F-test of variance analysis, and treatment means were compared using the Scott-Knott test with the SISVAR software. The treatments with velvet bean (*Mucuna*) and velvet bean with limestone achieved the best results. Strategies involving velvet bean had a positive impact on soil quality in degraded areas, increasing moisture, reducing penetration resistance and soil density, and improving aggregate stability. Velvet bean combined with limestone enhanced chemical aspects such as pH, Ca, SB, V%, CO, MOS, and ECO. This highlights the importance of velvet bean in soil recovery management over 30 years, especially at depths of 5–10 cm and 10–20 cm. The restoration management using pigeon pea/jack bean, combined with gypsum and liming, showed improvements in attributes such as gravimetric moisture, infiltration, soil density, pH, Ca, Mg, K, SB, V%, and MOS, suggesting it as a promising option for improving soil structure compared to other strategies involving these soil conditioners.

Keywords: cover crops; green manure; soil degradation; soil organic matter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Concentração média global de CO ₂ em partes por milhão (ppm) na atmosfera de 1984 a 2023	17
Figura 2 – Caminhos Representativos de Concentração ao longo do século XXI	18
Figura 3 – Comportamento da temperatura média global entre os anos 1850-2020	19
Figura 4 – Imagem de satélite indicando área experimental	25
Figura 5 – Vista geral da área decapitada mostrando o corte de 8,60 m de espessura	26
Figura 6 – Vista geral do experimento, janeiro de 2023	30
Figura 7 – Amostras deformáveis e indeformáveis do solo	31
Figura 8 – Avaliações de umidade gravimétrica do solo e resistência mecânica do solo à penetração	32
Figura 9 – Coleta e preparo de amostras para avaliação da densidade do solo.....	33
Figura 10 – Preparo de amostras para avaliação de estabilidade de agregados.....	33
Figura 11 – Análise de infiltração de água no solo à campo	34
Figura 12 – Análise da fertilidade do solo	35
Figura 13 – Análise de teor de matéria orgânica do solo	36
Figura 14 – Fracionamento físico (granulométrico) da matéria orgânica do solo	37
Figura 15 – Determinação de C orgânico.....	38
Figura 16 – Resistência mecânica do solo à penetração	41
Figura 17 – Umidade gravimétrica do solo	43
Figura 18 – Densidade do solo.....	44
Figura 19 – Diâmetro médio ponderado e Índice de estabilidade de agregados do solo	47
Figura 20 – Infiltração de água do solo	49
Figura 21 – pH e acidez potencial do solo	51
Figura 22 – Teor Cálcio e Magnésio do solo.....	54
Figura 23 – Teor fósforo e potássio do solo	56
Figura 24 – Soma de bases, Capacidade de troca catiônica e Saturação por bases	59
Figura 25 – Carbono orgânico do solo	61
Figura 26 – Teor de matéria orgânica do solo.....	63
Figura 27 – Estoque de carbono orgânico do solo	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tratamentos ao longo do tempo.....	27
Tabela 2 – Resultados da análise química do subsolo exposto, realizada antes da implantação do experimento em 1992	28
Tabela 3 – Resultados da análise física do solo original (área adjacente), em três profundidades, realizada antes da implantação do experimento em 1992.....	28
Tabela 4 – Resultados médios da análise química dos tratamentos estudados, em três profundidades, realizadas em 2011	29
Tabela 5 – Resultados médios da densidade e macroporosidade do solo, dos tratamentos estudados, em três profundidades, realizadas em 2011	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral.....	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1	Mudanças climáticas	16
3.2	Degradação do solo.....	19
3.3	Recuperação do solo.....	21
3.4	Qualidade do solo.....	23
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	25
4.1	Caracterização inicial da área experimental.....	25
4.2	Delineamento experimental e tratamentos.....	26
4.3	Histórico da área.....	27
4.4	Avaliações	30
4.4.1	<i>Umidade gravimétrica do solo.....</i>	<i>31</i>
4.4.2	<i>Resistência mecânica do solo à penetração.....</i>	<i>31</i>
4.4.3	<i>Densidade do solo</i>	<i>32</i>
4.4.4	<i>Estabilidade de agregados (via úmida).....</i>	<i>33</i>
4.4.5	<i>Infiltração de água no solo</i>	<i>34</i>
4.4.6	<i>Análise química do solo.....</i>	<i>34</i>
4.4.7	<i>Fracionamento físico da MOS</i>	<i>36</i>
4.4.8	<i>Estoque de C orgânico.....</i>	<i>38</i>
4.5	Análise estatística	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1	Resistência mecânica à penetração.....	40
5.2	Umidade gravimétrica do solo.....	41

5.3	Densidade do solo	43
5.4	Estabilidade de agregados (via úmida).....	45
5.5	Infiltração de água no solo	48
5.6	Potencial hidrogeniônico (pH) e Acidez potencial.....	50
5.7	Cálcio, Magnésio, Fósforo e Potássio	51
5.8	Soma de bases, Capacidade de troca catiônica e Saturação por bases .	57
5.9	Fracionamento físico da matéria orgânica	60
5.10	Teor de matéria orgânica no solo.....	61
5.11	Estoque de carbono no solo.....	63
6	CONCLUSÃO.....	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais adversidades da humanidade na atualidade é o cenário de mudanças climáticas intensificadas por gases de efeito estufa (GEE) emitidos principalmente por atividades antrópicas, que vem causando um aumento da temperatura média global (IPCC, 2021). Entre as atividades humanas que contribuem significativamente para as emissões de GEE estão a mudança do uso do solo e florestas (2,9%) e atividades agropecuárias (12,3%), juntas, correspondem por 15,2% das emissões, segundo dados da World Resource Institute (2023). No Brasil, apenas esses dois setores correspondem a 75% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) (Tsai *et al.*, 2023).

Parte do carbono (C) emitido desses setores são ocasionados pela remoção de vegetação nativa e degradação do solo. Segundo a FAO (2015) cerca de um terço dos solos do mundo apresentam algum nível de degradação. No Brasil, até 25% da vegetação nativa apresenta algum estado de degradação e cerca de 28 milhões de hectares de pastagens estão degradadas (Bolfé *et al.*, 2024; Lama *et al.*, 2024). Entre as causas de degradação está a remoção do solo de uma área, deixando o subsolo exposto, são chamadas de áreas de empréstimo, onde uma camada de solo é removida para sua utilização em construções de grandes obras de engenharia, como é o caso de obras de usinas hidroelétricas no Brasil, as quais são responsáveis por 64% da produção de eletricidade do país. Uma dessas obras é a construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, na década de 1960, a qual ocasionou a formação de uma área que sofre degradação acentuada (Alves; Nascimento; Souza, 2012; Carvalho *et al.*, 2017; Souto *et al.*, 2017).

Antes habitados com biodiversidade de fauna e flora, locais com acentuada degradação se tornam áreas de baixa qualidade de solo, suscetíveis à erosão, compactadas, com perda de matéria orgânica do solo (MOS), desbalanço de nutrientes no solo e diminuição da fertilidade, dessa forma, esses locais se tornam foco de emissão de CO₂ além de ficarem ociosos. Nesse sentido, a recuperação das áreas em qualquer estado de degradação é necessária para reverter o quadro de C, sequestrando e armazenando-o no solo e vegetação. Estes possuem papel fundamental na mitigação de impactos da mudança climática visto que possuem

impacto direto no ciclo global de C, diminuindo níveis na atmosfera (Sá; Santos Junior, 2005; FAO, 2015; He *et al.*, 2024; Qian *et al.*, 2024; Bolfe *et al.*, 2024).

Nesse cenário, técnicas de investigação que visam a recuperação dos solos degradados têm sido cada vez mais estudadas, testando diversas técnicas, entre elas, manejos com espécies vegetais de cobertura, como adubação verde, preparo e correção de solo (Kochhann; Denardin; Berton, 2000; Raij *et al.*, 2001; Bonini; Alves, 2012; Bonini; Alves; Montanari, 2015; Souto *et al.*, 2017; Chitero *et al.*, 2020; Lima Filho *et al.*, 2023; He *et al.*, 2024; Qian *et al.*, 2024). Durante a recuperação de um solo convém utilizar métodos para medir sua qualidade a fim de acompanhar a evolução desse processo (Abdu *et al.*, 2023; Sepehya *et al.*, 2024).

Diversos são os parâmetros que servem como indicadores de qualidade do solo, alguns deles são umidade gravimétrica do solo, resistência mecânica à penetração, densidade do solo, estabilidade de agregados (via úmida), infiltração de água no solo como indicadores físicos e teor de MOS, fracionamento da MO, pH, acidez potencial ($H + Al$), somas de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), teores de nutrientes como fósforo (P), potássio (K) e magnésio (Mg) como indicadores químicos (Raij *et al.*, 2001; Bonini; Alves, 2012; Lepsch, 2021; Reichert; Reinert; Braida, 2023).

Dessa forma, a utilização de métodos capazes de medir a qualidade do solo se torna muito importante para mensurar a evolução de manejos utilizados no processo de recuperação de áreas degradadas e avaliar sua eficiência ou a necessidade da aplicação de outros manejos para potencializar o processo de recuperação, contribuindo dessa forma com a mitigação de impactos negativos advindos da crise climática (Bonini; Alves, 2012; Bonini; Alves; Montanari, 2015; Abdu *et al.*, 2023; Reichert; Reinert; Braida, 2023; He *et al.*, 2024; Qian *et al.*, 2024; Sepehya *et al.*, 2024).

Nesse sentido, é importante a aplicação de técnicas capazes de restaurar áreas em estado de degradação visando restabelecer as características originais do solo e avaliar com indicadores de qualidade a capacidade de resiliência do ecossistema com a implementação diferentes manejos para potencializar o processo de recuperação do solo e mitigar danos causados por mudanças climáticas (Bonini; Alves, 2012; Bonini; Alves; Montanari, 2015; Abdu *et al.*, 2023; Reichert; Reinert; Braida, 2023; He *et al.*, 2024; Qian *et al.*, 2024; Sepehya *et al.*, 2024).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar propriedades físicas e químicas de um Latossolo Vermelho decapitado em processo de recuperação há 30 anos.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a eficiência de diferentes manejos conservacionistas na recuperação do solo em estudo.
- Utilizar indicadores físicos e químicos do solo para avaliar a evolução da recuperação do solo
- Determinar a densidade do solo, distribuição e estabilidade de agregados em água, taxa de infiltração de água, retenção de água no solo, resistência do solo à penetração e umidade do solo (indicadores físicos da qualidade do solo estudado).
- Determinar os teores de Ca, P, K, Mg, MOS, C orgânico e o pH, além da acidez (H + Al) a pH 7,0, determinar SB, CTC e V% (indicadores químicos da qualidade do solo estudado).
- Determinar o estoque de C do solo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Mudanças climáticas

A temperatura e o clima da Terra estão mudando rapidamente ao longo das últimas décadas, caracterizando o cenário atual de mudanças climáticas do planeta que caminha no sentido de aumentar a temperatura média global, resultando no aquecimento global. Essa alteração se deve principalmente a atividades antrópicas, visto que a velocidade das mudanças do clima marca um nível de aceleração sem precedentes na história do planeta. Alterações naturais de temperatura e clima durante vários dos períodos geológicos da Terra se dão em milhares de anos, e a mudança climática atual se inicia a partir da Revolução Industrial (IPCC, 2021; Rayhan; Kinzler; Rayhan, 2023; Kumar, 2024).

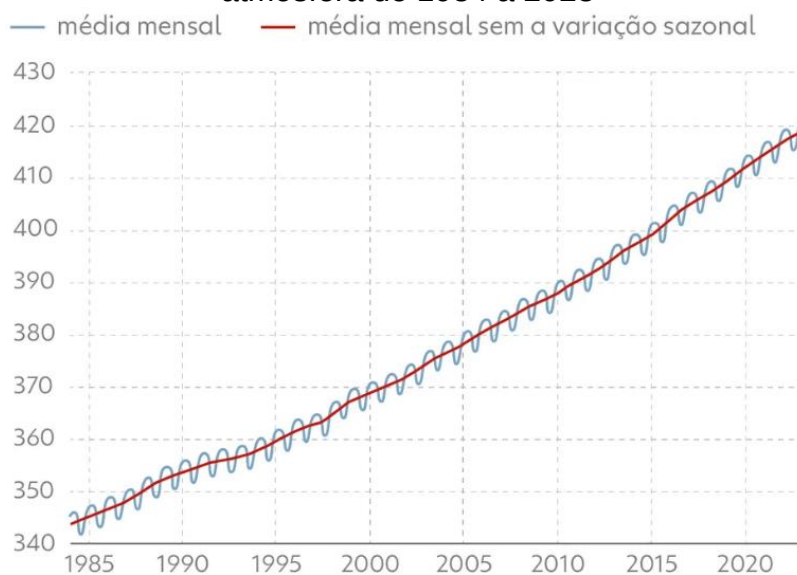
Esse cenário se dá principalmente devido à altos níveis de emissão na atmosfera de GEE decorrente de atividades humanas, como a exploração e queima de combustíveis fósseis - carvão, gás natural e petróleo - além de atividades agropecuárias, mudança do uso da terra e florestas, atividades industriais, setor do transporte e resíduos (IPCC, 2021; Rayhan; Kinzler; Rayhan, 2023; Zheng; Zhang; Zhang, 2023; Kumar, 2024).

No período pré-industrial, 1750, a concentração de CO₂ na atmosfera era de 278 ppm, e segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM), a concentração desse gás atingiu novo recorde em 2023, 420 ppm (Figura 1), o que representa um aumento de 11,4% em 20 anos e 151% comparado ao período pré-industrial. O aumento da concentração desse gás foi de 2,3 ppm em 2023, sendo este o 12º ano consecutivo de aumento superior a 2 ppm (Tarasova *et al.*, 2021; Zheng, Zhang e Zhang, 2023; Crotwell *et al.*, 2024). Além do CO₂, outros gases de efeito estufa como o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) também obtiveram grande aumento em suas concentrações na atmosfera comparado ao período pré-industrial, com 265% ou 1.934 ppb e 125% ou 336 ppb respectivamente, no ano de 2023 (Crotwell *et al.*, 2024).

De acordo com a OMM, a velocidade de acúmulo de CO₂ da atmosfera é a maior da história da humanidade (Figura 1), causada principalmente por incêndios florestais, redução da capacidade das florestas de absorver carbono e uso de combustíveis fósseis. Segundo Celeste Saulo (2024), secretária-geral da OMM, as

ações dos países estão longe de ser o suficiente para cumprir a meta do Acordo de Paris, proposto em 2015, que tem como objetivo limitar o aquecimento global abaixo de 2 °C, buscando o nível de 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais até o final do século (Crotwell *et al.*, 2024).

Figura 1 – Concentração média global de CO₂ em partes por milhão (ppm) na atmosfera de 1984 a 2023



Fonte: Crotwell *et al.* (2024).

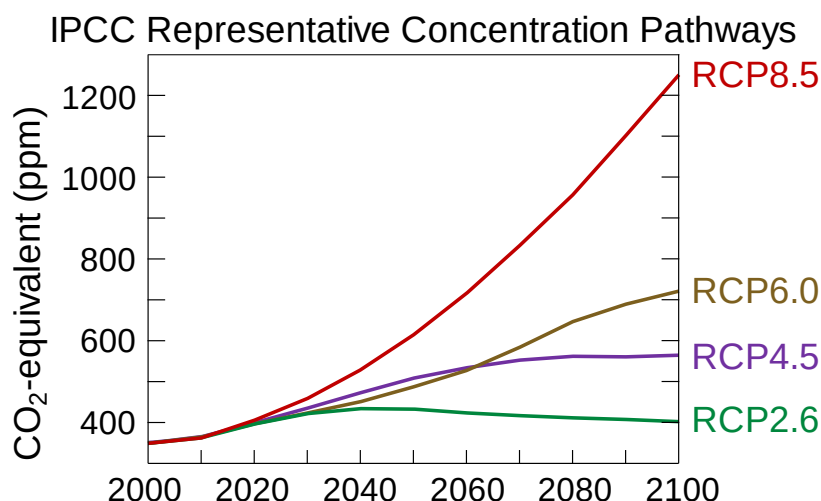
A crise climática causa diversas consequências como o aumento da frequência de eventos climáticos extremos como calor extremo, secas intensas, causando desabastecimento de água para consumo doméstico, industrial e agropecuário, ou chuvas concentradas em pequenos períodos provocando alagamentos e enchentes, além da desertificação de biomas, derretimento de geleiras, aumento do nível do mar, aumento de refugiados climáticos, acidificação de oceanos, embranquecimento de corais e perda de biodiversidade (Khatsuriya *et al.*, 2001; Raza *et al.*, 2019; Santojanni *et al.*, 2023; Horton *et al.*, 2020; Kumar, 2024; Ripple *et al.*, 2024; Üçler; Özşahin, 2024; Uddin; Chaudhry; Shabir, 2024).

Além disso, estudos sugerem a possibilidade de um processo de extinção em massa em andamento devido à velocidade e proporção da perda de biodiversidade no planeta. Esse processo ocorre quando mais de 60% das espécies de seres vivos no mundo entram em extinção, até o momento foram documentadas cinco extinções em massa no mundo (IPCC, 2021; Davis, 2023; Santojanni *et al.*, 2023; Khatsuriya, Makwana; Dodia, 2024; Uddin; Chaudhry; Shabir, 2024)

O atual estágio de mudanças climáticas se encontra em um nível de irreversibilidade para alguns impactos, como é o caso do derretimento das geleiras, aumento do nível do mar, acidificação dos oceanos e aumento da temperatura média global. Porém, a intensidade dos impactos deve ser maior ou menor dependendo das ações conjuntas globais para frear ou não as emissões dos gases, determinando os rumos da humanidade (Khatsuriya *et al.*, 2001; Horton *et al.*, 2020; Alsulami; Petrovskii, 2023; Vavrus *et al.*, 2024).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC (2021) desenvolveu os Caminhos Representativos de Concentração (RCPs) nos quais foram avaliadas diferentes caminhos de emissões e concentrações de GEE ao longo do século XXI (Figura 2) resultando em diferentes cenários sobre a intensidade das mudanças climáticas como o aumento de temperatura, elevação do nível do mar, derretimento de geleiras e impactos ambientais associados, até o fim do século. Esses cenários estimam aquecimento abaixo de 2 °C à aquecimento acima de 4 °C até o final do século XXI.

Figura 2 – Caminhos Representativos de Concentração ao longo do século XXI



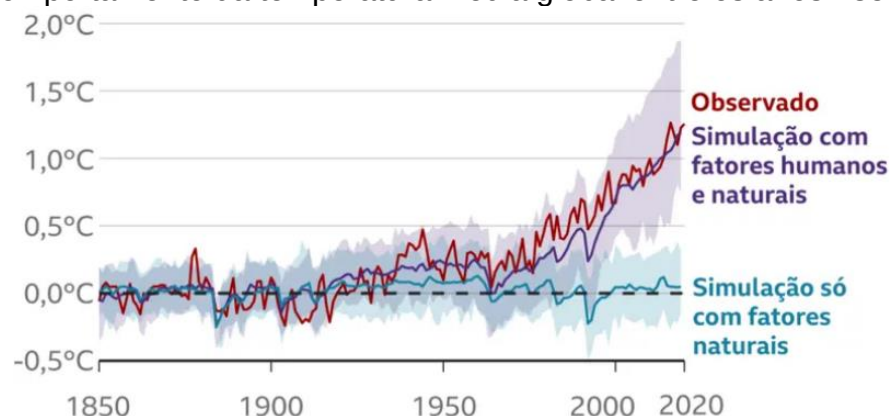
Fonte: IPCC (2021).

Legenda: Valores da forçante radiativa em W/m^2 de quatro RCPs e níveis de CO_2 .

Entre os cenários de emissões de C previstos por cientistas, a meta do Acordo de Paris não será cumprida. Neste século, o planeta já atingiu aquecimento de 1 °C acima dos níveis pré-industriais (Figura 3), e caso o ritmo atual seja mantido, poderá chegar a 1,5 °C até 2040. Nesse mesmo ritmo, até o final do século, a média de temperatura da Terra poderá subir em níveis acima de 4 °C (IPCC, 2021; Crotwell *et*

al., 2024) e o nível do mar subir em mais de 1 metro em 2100 dependendo da emissão de GEE e 5 metros até 2300, com o degelo da Groelândia (Horton *et al.*, 2020; IPCC, 2021).

Figura 3 – Comportamento da temperatura média global entre os anos 1850-2020



Fonte: IPCC (2021).

No entanto, contando com esforços para conter avanços da crise climática, neutralizando ou diminuindo a emissão de GEE e reduzindo sua concentração na atmosfera, o cenário futuro pode ser mais otimista, com um aumento médio de temperatura de 2 °C ou abaixo, e aumento do nível do mar em 0,5 metro até 2100. A neutralização da emissão de CO₂ na atmosfera, substituindo combustíveis fósseis por energias renováveis, a mudança no uso da terra, com o cessamento de desmatamento e queimadas, além de políticas de sequestro de C da atmosfera é extremamente necessário para obter esse cenário (IPCC, 2021; Rayhan; Kinzler; Rayhan, 2023; Kumar, 2024).

3.2 Degradação do solo

Dentre os principais setores de emissão global de GEE, estão a mudança do uso da terra e florestas e a agropecuária (contabilizando queimadas, desmatamento, transformação de vegetação nativa em áreas agrícolas e de pecuária e produção agropecuária), em 2020 contribuíram com 2,9% e 12,3%, respectivamente, na emissão de GEE (IPCC, 2021; WRI, 2023). No Brasil, 75% das emissões de CO₂ tem como origem esses setores, sendo 48% de mudança do uso da terra e floresta e 27% da agropecuária (Tsai *et al.*, 2023). Em 2024, de janeiro a outubro 27,6 milhões de

hectares foram queimados, sendo 74% de vegetação nativa. Esse valor representa um aumento de 15 milhões de hectares a mais que em 2023, o que significa um salto de 119% (MapBiomas, 2024). Essas mudanças do uso da terra são um dos principais fatores para a severa perda de biodiversidade devido a alteração do habitat e condições naturais de vida de diversos seres vivos (Pendrill *et al.*, 2022; Tsai *et al.*, 2023).

Muitas das áreas alteradas sofrem processo de degradação, pois além da remoção de espécies vegetais nativas, que regulam a microrregião e a qualidade do solo, muitas áreas transformadas para produção agropecuária sofrem uma exploração intensa e manejo inadequado do solo. Práticas como uso do fogo para limpar áreas, preparo intensivo do solo, monocultivo (sem rotacionar), ausência de cobertura vegetal no solo e uso indiscriminado fertilizantes e agrotóxicos além de causar a contaminação do solo e lençóis freáticos, comprometem a agregação e estrutura do solo, exaurindo-o e intensificando o processo de sua degradação (Dieckow *et al.*, 2004; Zuazo; Pleguezuelo, 2009; Rasool; Thakur *et al.*, 2021; Thakur, 2022; Yadav *et al.*, 2022; Belete; Yadete, 2023; Tsai *et al.*, 2023).

Outro motivo da degradação do solo é a formação de áreas de empréstimo, áreas onde uma camada do solo é removida para sua utilização em construção de grandes obras de engenharia, com é o caso da construção de usinas hidroelétricas. A partir da década de 1960 grandes hidroelétricas foram construídas no Brasil devido à grande disponibilidade de recursos hídricos favorecendo esse tipo de exploração de energia. Atualmente, essa energia é responsável por cerca de 64% da produção de eletricidade do país (Brasil, 2023). Durante a construção dessas obras, formam-se grandes áreas de empréstimo, removendo a vegetação nativa e horizontes do solo, deixando o subsolo exposto, também conhecido como solo decapitado, causando acentuada degradação do solo (Souto *et al.*, 2017).

De acordo com a (FAO, 2015), cerca de um terço dos solos do mundo apresentam estado de moderada a alta degradação devido ao uso inadequado. No Brasil há cerca de 28 milhões de hectares de pastagens degradadas (Bolfe *et al.*, 2024) e de acordo com relatório do MapBiomas considerando dados de 1986 a 2021 até 25% da vegetação nativa apresenta algum estado de degradação, representando uma área de até 135 milhões de hectares (Lama *et al.*, 2024).

Antes habitados com biodiversidade de fauna e flora, locais com acentuada degradação se tornam áreas de baixa qualidade de solo, solos mais compactados,

com baixa porosidade, o que dificulta a penetração das raízes ao solo e a infiltração de água no solo, desbalanço de nutrientes, suscetíveis à erosão, com baixo teor de matéria orgânica, dessa forma, esses locais se tornam foco de emissão de CO₂ e normalmente ficam ociosos. Nesse sentido, a recuperação das áreas é necessária tanto para reverter o quadro de ociosidade, como para prestar um serviço ambiental com a recuperação da biodiversidade e reverter o quadro de C, neutralizando, sequestrando e armazenando-o no solo e vegetação (Sá; Santos Junior, 2005; FAO, 2015; Bolfe *et al.*, 2024; He *et al.*, 2024; Qian *et al.*, 2024).

3.3 Recuperação do solo

O solo e as plantas são importantes armazenadores de C. Estima-se que o C se encontra entre 750 a 760 Pg (petagrama) de C na atmosfera, 470 a 655 Pg na vegetação, em torno de 800 Pg na MOS camada de 0-30 cm e entre 1500 a 2000 Pg de C no solo em até 1 m de profundidade (1 Pg de C = 10¹⁵ g de carbono) e desse carbono do solo, metade encontra-se sob solos florestais. Logo, o papel do solo no combate às mudanças climáticas é muito importante pois impacta diretamente o ciclo global de carbono, diminuindo níveis na atmosfera (Eswaran; Berg; Reich, 1993; Dixon *et al.*, 1994; Lal, 2004; Cerri *et al.*, 2006; Lal *et al.*, 2007; Carvalho *et al.*, 2010).

Nesse cenário, técnicas de investigação que visam a recuperação dos solos degradados têm sido cada vez mais estudadas (Bonini; Alves, 2012; Bonini; Alves; Montanari, 2015; Souto *et al.*, 2017; Chitero *et al.*, 2020; He *et al.*, 2024; Qian *et al.*, 2024). Existem várias técnicas de recuperação de solo, entre elas estão o manejo com espécies vegetais de cobertura, principalmente adubação verde, preparo e correção de solo (Kochhann; Denardin; Berton, 2000; Rajj *et al.*, 2001; Bonini; Alves, 2012; Lima Filho *et al.*, 2023).

A adubação verde é um dos métodos mais utilizados na recuperação de solos, consiste na utilização de plantas leguminosas e gramíneas de baixa necessidade nutricional para servirem como cobertura do solo, fonte de matéria orgânica através da biomassa aérea e radicular, ciclagem de nutrientes, fixação biológica de nitrogênio (FBN) (leguminosas), descompactação do solo através da penetração das raízes, que são mais resistentes e fortes, levando à melhora de parâmetros como porosidade,

infiltração de água no solo e densidade, ou seja, melhora a estrutura do solo, e aumenta a fertilidade do solo (Lima Filho *et al.*, 2023).

Algumas das espécies utilizadas são a *Urochloa decumbens*, mucuna-preta, feijão-de-porco e feijão-guandu. A gramínea *Urochloa decumbens* apresenta tolerância à solos com baixa fertilidade, boa performance em ambientes sombreados, boa qualidade de forragem, possui muita biomassa aérea para cobertura densa do solo e sistema radicular fasciculado e superficial, ajudando no controle de erosão e fornecendo matéria orgânica superficial ao solo (Castro *et al.*, 2023; Lima Filho *et al.*, 2023).

As espécies leguminosas possuem sistema radicular pivotante, formam nódulos nas raízes em associação simbiótica com bactérias *Rhizobium* ou *Bradyrhizobium* para a FBN. A mucuna-preta é uma planta rústica, vigorosa, apresenta baixa demanda nutricional, altamente resistente à acidez do solo e déficit hídrico, produz grande quantidade de biomassa. Realiza FBN, supressão de nematoides patogênicos e plantas infestantes por efeito alelopático e/ou sombreamento (Lima Filho *et al.*, 2023; Cherubin, 2024).

O feijão-de-porco possui demanda de solos de fertilidade média a alta, especialmente ricos em MO, realiza FBN e controle de plantas invasoras através da competição e cobertura do solo (Lima Filho *et al.*, 2023; Cherubin, 2024). O feijão-guandu é uma cultura rústica, cresce bem em solos de fertilidade média, tolera secas prolongadas e é adaptado a regiões tropicais e subtropicais. Realiza FBN, pode reduzir população de nematoides, sua produção de biomassa com baixa relação C/N é ideal para adubação verde (Lima Filho *et al.*, 2023; Cherubin, 2024).

O preparo do solo é essencial em um ambiente degradado para iniciar o processo de descompactação. Em áreas muito compactadas, a utilização de maquinários que operam em profundidade é necessária para diminuir a densidade do solo, o que leva à diminuição da compactação e aumento da aeração e infiltração, acelerando e otimizando a performance de próximos manejos de recuperação (Kochhann; Denardin; Berton, 2000). Com o solo em processo de recuperação, melhorando sua estrutura, aumentando a agregação e aeração, melhorando sua densidade, o preparo pode ser significativamente diminuído ou dispensado, para não prejudicar a agregação e estrutura já bem formada, porém, em um primeiro momento, como sua estrutura está inadequada é necessário realizar um manejo mais intenso e consistente no solo (Kochhann; Denardin; Berton, 2000; Dieckow *et al.*, 2004).

Processos de calagem e gessagem possuem papel importante na recuperação de solos. A calagem atua na camada superficial do solo, equilibra o pH, diminuindo a acidez do solo, neutraliza alumínio e manganês tóxicos, fornece Ca e Mg, aumenta disponibilidade de P e Mo (Raij *et al.*, 2001). A gessagem consiste na aplicação de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) no solo, penetra facilmente no solo e atua em camada subsuperficial, fornece Ca e S, reduz efeito do Al^{3+} tóxico e pode suprir Zn, Cu e B. Essas técnicas contribuem para uma melhor agregação das partículas do solo e melhora a retenção e infiltração de água no solo, facilita a penetração das raízes no solo, além tornar o solo mais propício para o desenvolvimento de microrganismos, atua na FBN, favorece mineralização de nutrientes e melhora estruturação do solo (Raij *et al.*, 2001).

Durante o processo de recuperação do solo é muito pertinente utilizar metodologias capazes de medir a qualidade desse solo, para acompanhar a evolução de sua recuperação e auxiliar na escolha de possíveis manejos a serem adotados. Existem diversas técnicas capazes de realizar essas medições que podem ser de caráter físico, químico e biológico (Abdu *et al.*, 2023; Sepehya *et al.*, 2024)

3.4 Qualidade do solo

O solo é um material composto por parte química, física e biológica. Seu material de origem são as rochas, que juntamente outros fatores de formação como relevo, organismos, clima e tempo sofrem intemperismo, tendo como resultado a formação do solo, com diferentes horizontes, minerais, texturas, diferentes características que dependem dos fatores que o formaram. O solo é composto por porção mineral - areia, silte e argila, e sais solúveis e insolúveis, porção orgânica – organismos vivos (micro, meso e macrofauna), resíduos vegetais e animais em decomposição (MO), porção líquida – água e solução do solo (microporos) e porção gasosa – ar do solo (macroporos). Em média, a proporção das porções de um solo ideal, com boa qualidade, é de 45% mineral, 5% matéria orgânica, 25-33,5% água e 16,5-25% ar (Lepsch, 2021).

Os parâmetros físicos do solo medem a qualidade do solo de acordo com a estruturação do solo, aspectos físicos do solo dizem respeito à sua formação e material de origem, composição textura, e estrutura do solo, já os parâmetros químicos

medem a qualidade do solo de acordo com aspectos sobre nível de acidez do solo, nutrientes presentes e sua quantidade no solo, como se apresentam para as plantas (disponível ou indisponível), forma orgânica ou inorgânica, se estão em quantidades suficientes, em excesso ou em deficiência para o equilíbrio do solo e das plantas (Raij *et al.*, 2001; Bonini; Alves, 2012; Lepsch, 2021; Reichert; Reinert; Braida, 2023).

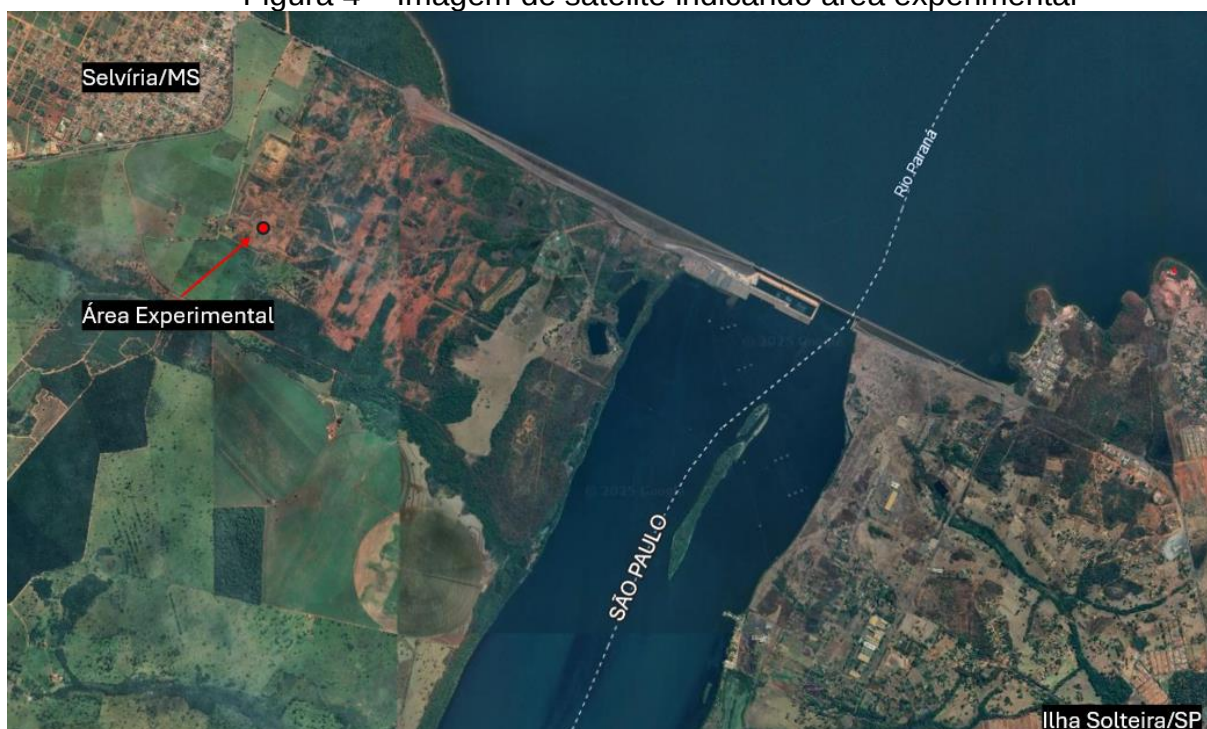
Alguns desses parâmetros físicos e químicos são umidade gravimétrica do solo, resistência mecânica à penetração, densidade do solo, estabilidade de agregados (via úmida), infiltração de água no solo, teor de matéria orgânica do solo, fracionamento da matéria orgânica, pH, acidez (H + Al), SB, CTC, V% e teores de nutrientes como P, K e Mg (Raij *et al.*, 2001; Bonini; Alves, 2012; Lepsch, 2021; Reichert; Reinert; Braida, 2023).

Dessa forma, a utilização de métodos capazes de medir a qualidade do solo se torna muito importante para mensurar a evolução de manejos utilizados no processo de recuperação de áreas degradadas e avaliar sua eficiência ou a necessidade da aplicação de outros manejos para potencializar o processo de recuperação, contribuindo dessa forma com a mitigação de impactos negativos advindos da crise climática (Bonini; Alves, 2012; Bonini; Alves; Montanari, 2015; Reichert; Reinert; Braida, 2023; Abdu *et al.*, 2023; He *et al.*, 2024; Qian *et al.*, 2024; Sepehya *et al.*, 2024).

4 MATERIAL E MÉTODOS

O projeto de pesquisa ocorreu no período de janeiro de 2023 a junho de 2024. O experimento foi conduzido na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Unesp, Faculdade de Engenharia, Campus de Ilha Solteira/SP, no município de Selvíria/MS (Figura 4). A fazenda está situada na região noroeste do Estado de São Paulo, entre as coordenadas 20°22' de latitude Sul e 51°22' de longitude Oeste, e altitude em torno de 327 metros acima do nível do mar, onde a temperatura média anual é de 23,5 °C e a precipitação média anual de 1370 mm. O solo característico da região de estudo é um textura franco argilo-arenosa e rico em sesquióxidos, e classificado como Latossolo Vermelho distrófico (Santos *et al.*, 2018).

Figura 4 – Imagem de satélite indicando área experimental



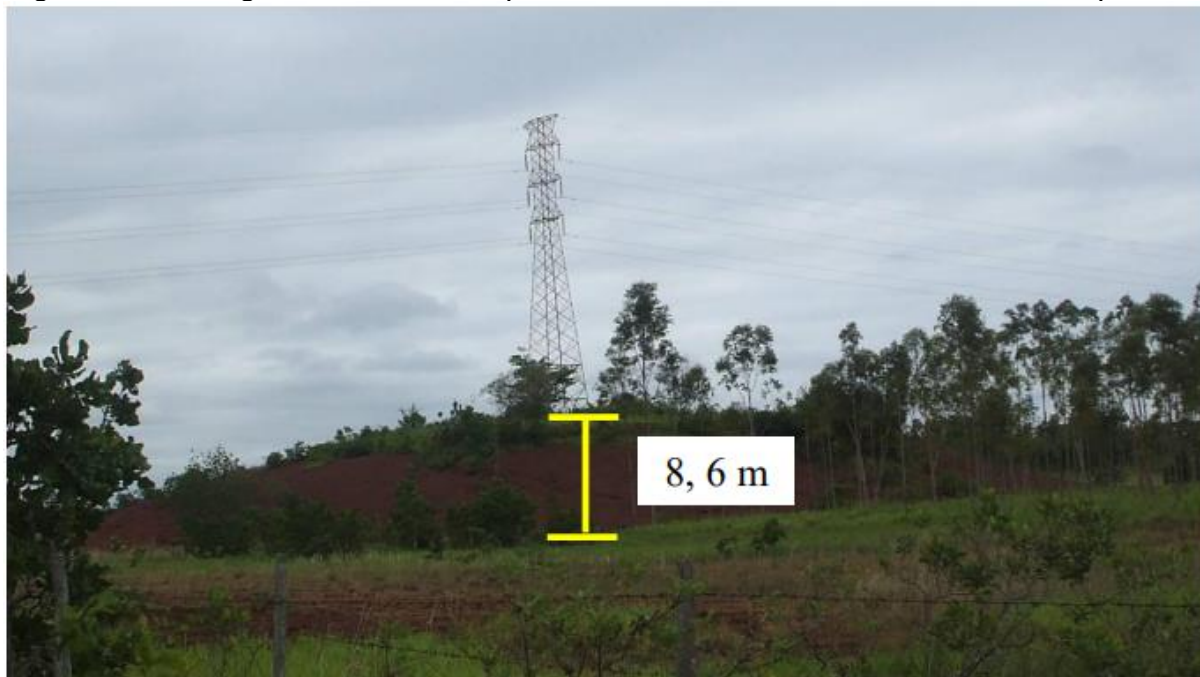
Fonte: elaboração do próprio autor.

4.1 Caracterização inicial da área experimental

A região estudada é uma área degradada, onde foi removida uma camada de 8,6 metros do perfil do solo original (Figura 5), deixando o subsolo exposto desde 1969. A área de empréstimo surgiu da retirada de solo para a terraplanagem e

fundação da barragem da usina Hidrelétrica de Ilha Solteira – SP, que teve o início de sua construção na década de 60 (Alves; Nascimento; Souza, 2012).

Figura 5 – Vista geral da área decapitada mostrando o corte de 8,60 m de espessura



Fonte: Bonini (2012).

4.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos casualizados com parcelas de 10m x 10m com espaçamento de 2 m entre si, tendo a aplicação de nove tratamentos e quatro repetições conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Tratamentos ao longo do tempo

Tratamentos	1992-1994	1994-1997	1997	1998	1999	2009
T1 SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE
T2 MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA
T3 SM	SM	SM				
T4 MP	MP	MP				
T5 G/F	G	P				
T6 MP + C	MP + C	MP + C	Milho	Aveia Preta	<i>Urochloa decumbens</i>	Vegetação espontânea
T7 G/F + C	G + C	P + C				
T8 MP+C+Ge	MP+C+Ge	MP+C+Ge				
T9 G/F+C+Ge	G+C+Ge	P+C+Ge				

Fonte: elaboração do próprio autor.

Legenda: Composição dos tratamentos: T1 (Controle) - Solo exposto (sem técnica de recuperação); T2 (Controle) - Vegetação nativa de Cerrado; T3 - solo mobilizado (vegetação espontânea); T4 - Mucuna-preta – MP (*Stizolobium aterrium* Piper & Tracy); T5 - Guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) até 1994, após substituído por Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC) – G/F; T6 – Calcário + Mucuna-preta – C+MP; T7 – Calcário + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco – C+G/F; T8 – Calcário + Gesso + Mucuna-preta – C+Ge+MP; T9 – Calcário + Gesso + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco – C+Ge+G/F.

4.3 Histórico da área

O processo de recuperação da área foi iniciado em 1992, o subsolo apresentava compactação superficial e baixa presença de vegetação espontânea. Realizou-se o preparo do solo utilizando subsolagem atingindo profundidade média de 0,40 m. Foi feita uma aração e após essa operação, uma gradagem niveladora e realizada a caracterização físico-química da área (Tabelas 2 e 3).

A correção do solo foi baseada na caracterização química da área experimental. A aplicação de calcário para elevar a saturação por bases a 70%, foi efetuada, empregando-se a quantidade de 18,5 kg de calcário por parcela (1850 kg de calcário por ha) nas parcelas com calcário somente e, no caso das parcelas com calcário e gesso, houve a substituição de 25% de CaO do calcário por 25% do gesso, aplicando-se 5,2 kg de gesso (520 kg de gesso por ha) e 13,8 kg de calcário por 9 parcela (1380 kg de calcário por ha), ambos juntos incorporados no solo. Foi utilizado calcário dolomítico com PRNT de 70%.

Tabela 2 – Resultados da análise química do subsolo exposto, realizada antes da implantação do experimento em 1992

Prof. (m)	P _{resina} mg dm ⁻³	M.O. g dm ⁻³	pH CaCl ₂	K	Ca	Mg	H + Al mmolc dm ⁻³	SB	CTC	V %
0,00-0,20	1	7,0	4,0	0,2	2,0	1,0	20,0	3,2	23,2	14
0,20-0,40	0	4,0	4,2	0,2	2,0	1,0	20,0	3,2	23,2	14

Fonte: Alves; Nascimento; Souza (2012).

Tabela 3 – Resultados da análise física do solo original (área adjacente), em três profundidades, realizada antes da implantação do experimento em 1992

Prof. (m)	Densidade do solo (kg dm ⁻³)	Macroporosidade (m ³ m ⁻³)
0,00-0,10	1,52	0,10
0,10-0,20	1,69	0,08
0,20-0,40	1,74	0,07

Fonte: Alves; Nascimento; Souza (2012).

Espécies de adubos verdes (mucuna-preta, feijão-guandu e feijão-de-porco) foram semeadas em dezembro-janeiro dos anos de 1992 a 1996. A semeadura ocorreu manualmente e a densidade de semeadura foi de 10 plantas por metro linear, com o intuito de melhorar as características físicas e químicas do subsolo em estudo. No início do florescimento as plantas eram roçadas e deixadas da superfície.

A correção do solo foi repetida em 1996 com base na análise química, para os tratamentos com calcário e calcário + gesso. A correção foi efetuada nos casos em que a saturação por bases estava inferior a 60%, objetivando-se elevá-la a 70 %.

Em janeiro de 1997, foi semeada em toda a área experimental a cultura do milho (*Zea mays*) utilizando a semente AG 405 e 250 kg ha⁻¹ da fórmula 4-30-10 mais 0,3 % de zinco, sem aplicação de calcário, porém as plantas apresentaram pouco crescimento e baixo desenvolvimento. Em junho de 1998, foi semeada a aveia-preta (*Avena strigosa*), houve uma boa germinação, porém, a cultura não resistiu por falta de água. Em fevereiro de 1999, foi semeada a *Urochloa decumbens*, com o intuito de proteger o solo e acumular matéria orgânica. Em 2009, começaram a aparecer naturalmente espécies arbóreas nativas de cerrado.

De 2008 a 2012 foram estudadas algumas propriedades físicas e químicas do solo; massa seca da braquiária e a altura e diâmetro das espécies arbóreas nativas que surgiram espontaneamente na área, como indicadores de qualidade do Latossolo Vermelho decapitado, que estava em recuperação há 17 anos, utilizando adubos verdes, correção do solo, gesso e pastagem (Bonini; Alves, 2011). De 2014 até o

momento, a área se encontra cultivada com *Urochloa decumbens* e as árvores nativas que povoaram a área, principalmente *Machaerium acutifolium*. A área é cercada para proteção e o manejo adotado é a roçagem do capim regularmente (Figura 7). Os dados de recuperação dessa área estão apresentados nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Resultados médios da análise química dos tratamentos estudados, em três profundidades, realizadas em 2011

Prof. (m)	P _{resina} mg dm ⁻³	M.O. g dm ⁻³	pH CaCl ₂	K -----mmolc dm ⁻³ -----	Ca	Mg	H + Al	SB	CTC	V %
0,00-0,20	5	10,7	4,7	0,9	3,6	1,5	17,0	6,0	23,0	36
0,20-0,40	3	8,0	4,7	0,3	2,5	1,4	17,0	4,2	21,2	19,8

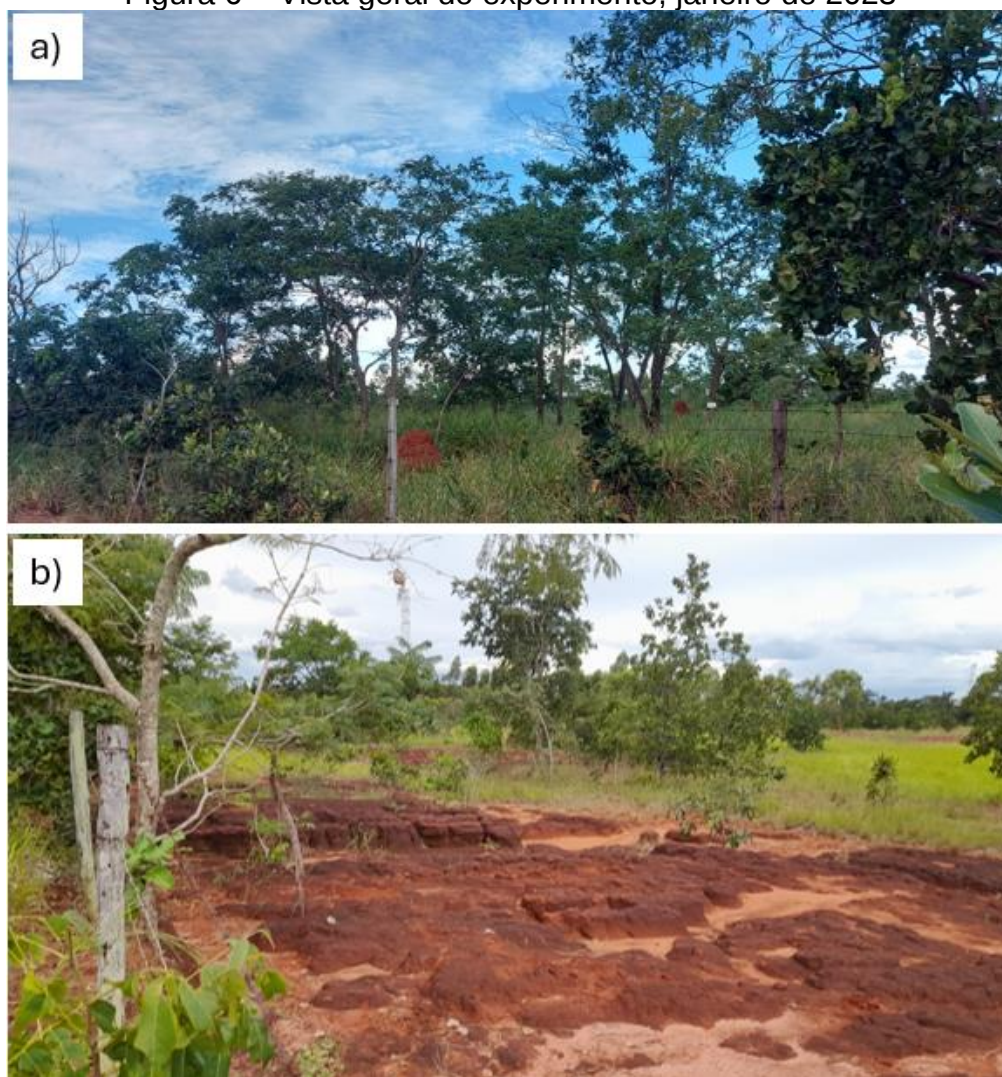
Fonte: Alves; Nascimento; Souza (2012).

Tabela 5 – Resultados médios da densidade e macroporosidade do solo, dos tratamentos estudados, em três profundidades, realizadas em 2011

Prof. (m)	Densidade do solo (kg dm ⁻³)	Macroporosidade (m ³ m ⁻³)
0,00-0,10	1,39	0,15
0,10-0,20	1,57	0,09
0,20-0,40	1,71	0,07

Fonte: Alves; Nascimento; Souza (2012).

Figura 6 – Vista geral do experimento, janeiro de 2023



Fonte: elaboração do próprio autor.

Legenda: a) vista geral do experimento com os tratamentos; b) vista da área com solo exposto.

4.4 Avaliações

Para as análises de solo foram coletadas amostras indeformadas e deformadas de solo (Figura 7), em três camadas de solo: 0,00–0,05; 0,05–0,10 e de 0,10–0,20 m.

As avaliações do solo foram: umidade gravimétrica, resistência mecânica à penetração, densidade, distribuição e estabilidade de agregados, taxa de infiltração de água, teores de P, K, Ca e Mg, MOS, pH, H + Al, SB, CTC e V%, fracionamento físico da MO e estoque de C.

Figura 7 – Amostras deformáveis e indeformáveis do solo



Fonte: elaboração do próprio autor.

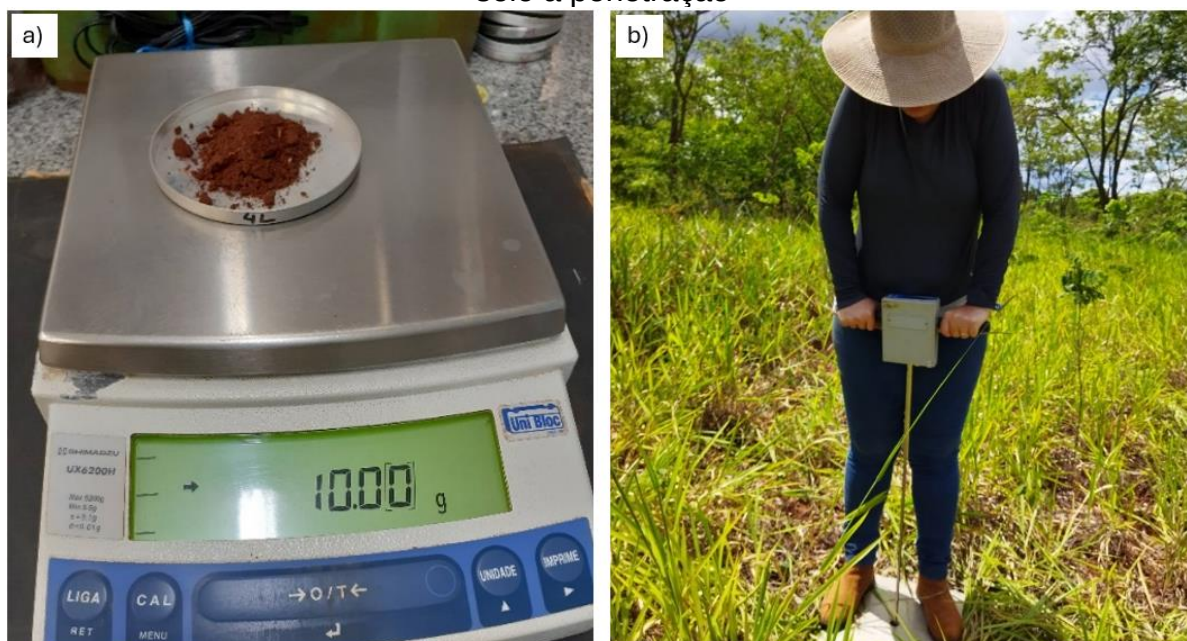
4.4.1 Umidade gravimétrica do solo

A umidade gravimétrica foi realizada pelo método de pesagem (Teixeira *et al.*, 2017), assim foi determinado o teor de água no solo, simultaneamente à mensuração da RP (resistência à penetração) (Figura 8a).

4.4.2 Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência do solo à penetração foi obtida usando o penetrológ, modelo Falker, Automação Agrícola (Figura 8). O penetrômetro digital automático - TE-096 é um equipamento eletrônico penetrológ, com cone tipo 2, operado manualmente (Falker, 2024). A resistência mecânica do solo à penetração foi determinada na camada de 0,00-0,05 m (Figura 8b). O penetrômetro foi configurado para registrar leituras a cada 10 mm de incremento de profundidade trabalhando a velocidade de penetração constante.

Figura 8 – Avaliações de umidade gravimétrica do solo e resistência mecânica do solo à penetração



Fonte: elaboração do próprio autor.

Legenda: a) amostra de umidade gravimétrica do solo; b) coleta de dados de resistência mecânica do solo à penetração.

4.4.3 Densidade do solo

A obtenção da densidade do solo envolve duas etapas: massa e volume da amostra, e foi determinada pelo método do anel volumétrico (Teixeira *et al.*, 2017) (Figura 9).

Figura 9 – Coleta e preparo de amostras para avaliação da densidade do solo



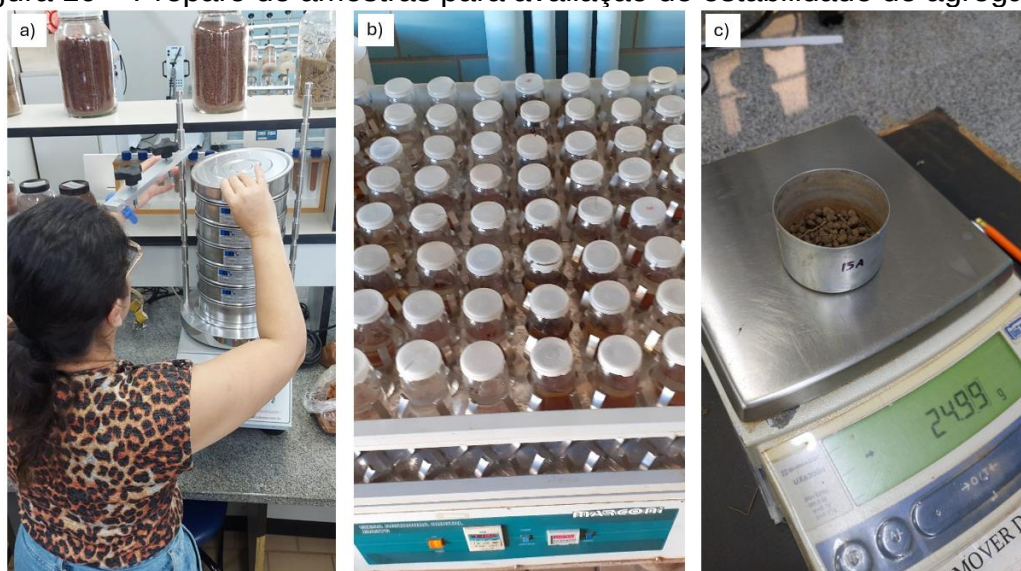
Fonte: elaboração do próprio autor.

Legenda: a) coleta de amostra indeformável em anel volumétrico, e b) secagem de anéis volumétricos para medição de densidade do solo.

4.4.4 Estabilidade de agregados (via úmida)

A distribuição e estabilidade de agregados em água foi analisada pela metodologia de Angers, Bullock e Mehuys (2008) (Figura 10).

Figura 10 – Preparo de amostras para avaliação de estabilidade de agregados



Fonte: elaboração do próprio autor.

Legenda: a) análise de agregados secos; b) amostras para análise de agregados úmidos em agitação; c) pesagem de agregados do solo.

4.4.5 Infiltração de água no solo

Foram realizadas 3 avaliações em cada parcela experimental utilizando o mini infiltrômetro de disco (Zhang, 1997) (Figura 11).

Figura 11 – Análise de infiltração de água no solo à campo



Fonte: elaboração do próprio autor.

Legenda: a) e b) análise de infiltração de água no solo utilizando mini infiltrômetro de disco.

4.4.6 Análise química do solo

Foram realizadas análises segundo metodologia descrita por Raij *et al.* (2001), foram avaliados teores de P, K, Mg e Ca pelo método de extração com resina trocadora de íons (Figura 12) e teor de MO (Figura 13). O pH foi determinado em CaCl_2 e H + Al a pH 7,0. Foram calculadas SB ($\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}$), CTC ($\text{SB} + (\text{H} + \text{Al})$) e V% ($100 \times \text{SB} / \text{CTC}$).

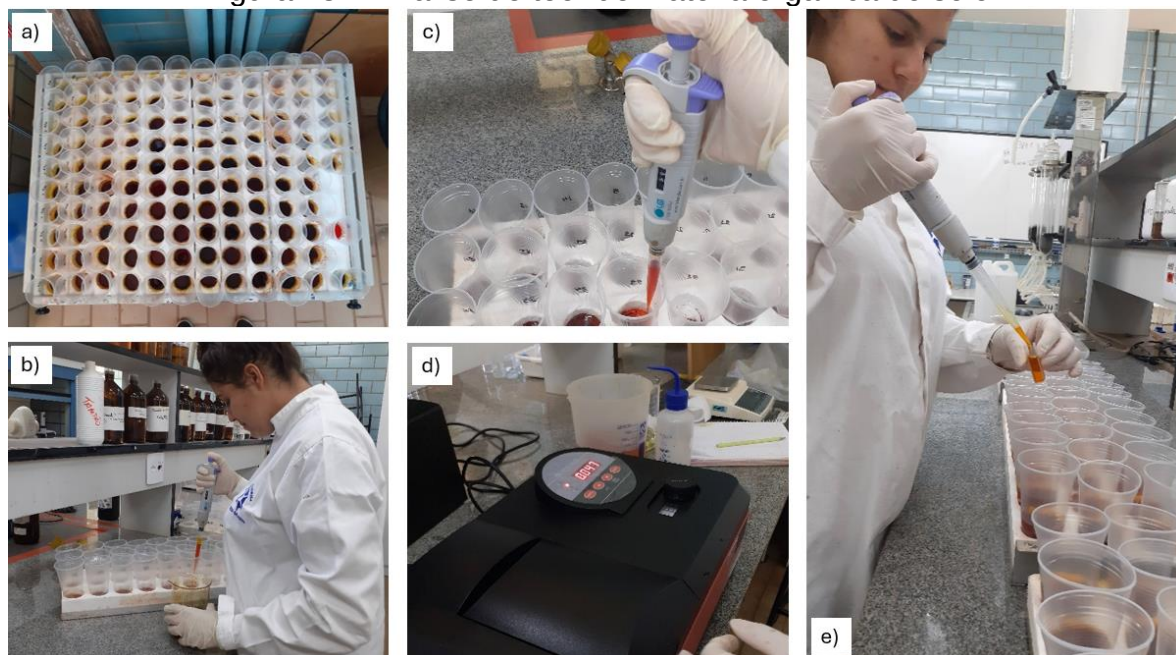
Figura 12 – Análise da fertilidade do solo



Fonte: elaboração do próprio autor.

Legenda: a) preparo das amostras com resina; b) leitura das amostras por espectrofotômetro de absorção atômica; c) amostra de P em cubeta pronta para leitura via espectrofotometria visível; d) preparo das amostras de P.

Figura 13 – Análise de teor de matéria orgânica do solo



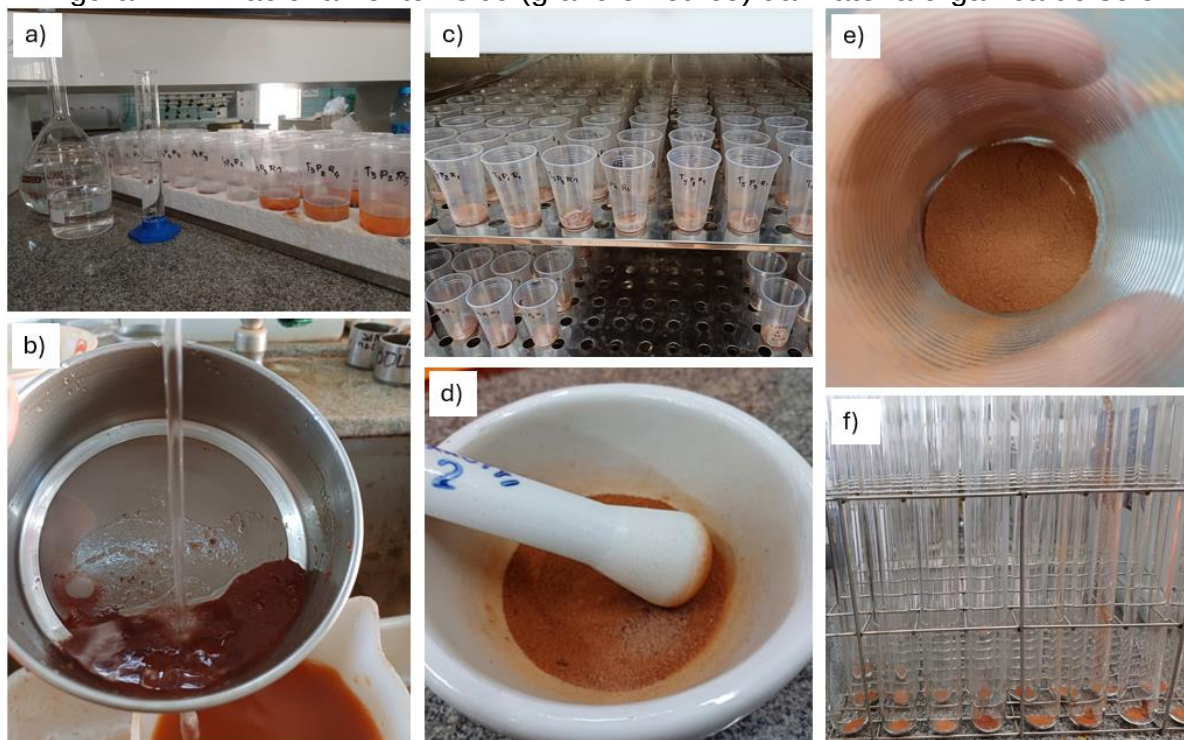
Fonte: elaboração do próprio autor.

Legenda: a) agitação das amostras; b) e c) pipetagem da solução (dicromato de sódio + ácido sulfúrico) nas amostras; d) leitura por espectrofotometria visível; e) pipetagem para leitura no espectrofotômetro visível.

4.4.7 Fracionamento físico da MOS

As amostras de solo foram analisadas através da técnica de fracionamento físico (granulométrico) da matéria orgânica do solo segundo o método de Cambardella e Elliott (1992) (Figura 14). A partir do fracionamento, foi realizada a determinação de C orgânico particulado seguindo a metodologia de Yeomans e Bremner (1988) (Figura 15).

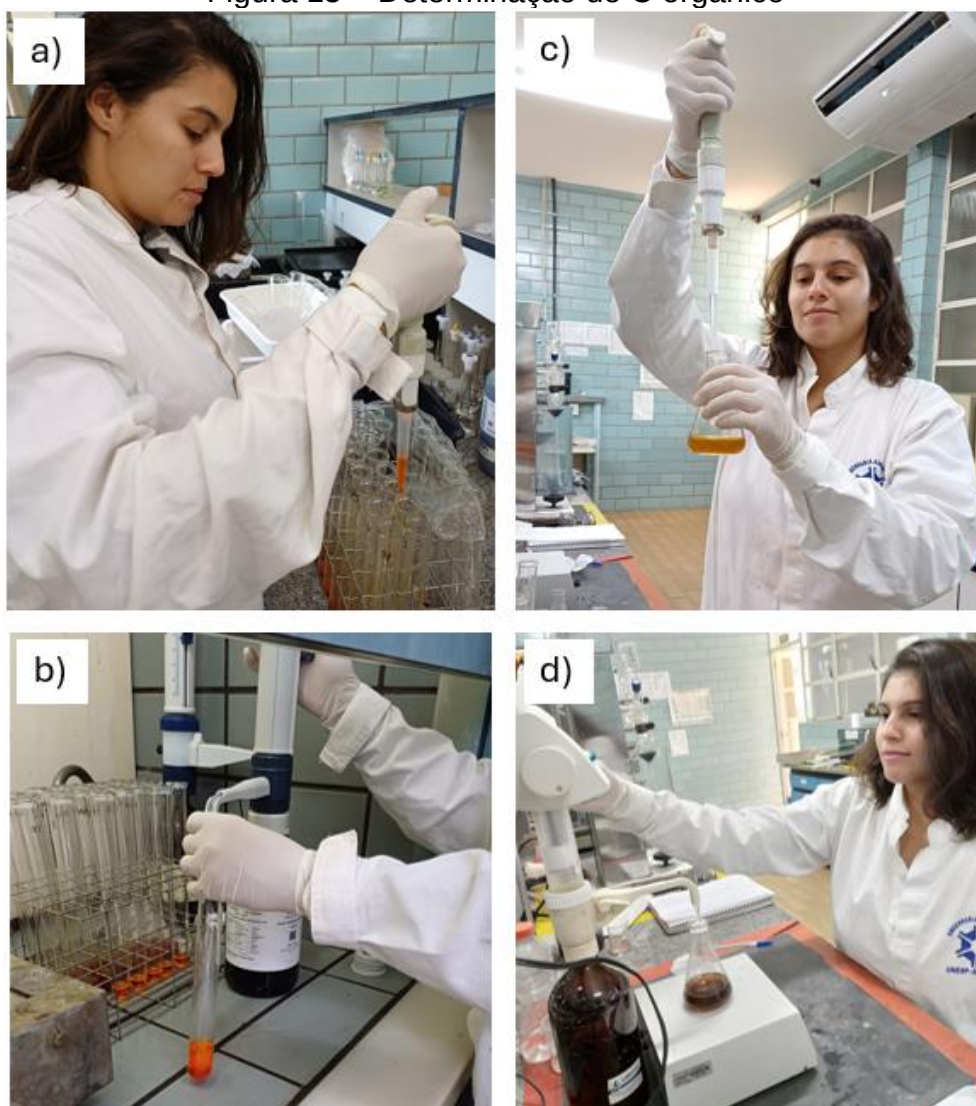
Figura 14 – Fracionamento físico (granulométrico) da matéria orgânica do solo



Fonte: elaboração do próprio autor.

Legenda: a) preparo das amostras; b) peneiramento úmido das amostras; c) secagem das amostras; d) solo moído em gral de porcelana; e) preparo das amostras para a determinação do C orgânico.

Figura 15 – Determinação de C orgânico



Fonte: elaboração do próprio autor.

Legenda: a) pipetagem da solução de dicromato de potássio no tubo digestor com amostras de solo; b) adição de ácido sulfúrico ao tubo digestor; c) adição de água deionizada às amostras d) leitura por titulação das amostras.

4.4.8 Estoque de C orgânico

As análises do conteúdo de C orgânico (C_{org}) foram analisadas segunda metodologia de Walkley & Black (1934). O estoque de C_{org} (ECO) na camada estudada ($t\ ha^{-1}$), foi determinado pela seguinte fórmula:

$$ECO = \frac{(COT * Ds * E)}{10} \quad (1)$$

Onde, o COT é o teor de C orgânico total na camada (g dm^{-3}), D_s é a densidade aparente do solo da camada estudada (g dm^{-3}) e E é a espessura da camada estudada (cm).

4.5 Análise estatística

Os resultados foram submetidos ao teste F da análise de variância e constatada a interação significativa entre as fontes de variação foi procedido o desdobramento, comparando as médias dos tratamentos pelo teste de Scott-Knott, adotando-se o nível de 5% de significância, de acordo com Pimentel-Gomes e Garcia (2002). Para essa análise estatística foi utilizado o software SISVAR desenvolvido por Ferreira (2011).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resistência mecânica à penetração

A resistência mecânica à penetração é um parâmetro que indica a força necessária que as raízes realizam para crescer e a capacidade do solo em ser permeável. Isso é crucial, pois a compactação excessiva do solo pode prejudicar o desenvolvimento das raízes, refletindo diretamente na boa estrutura e condição física geral do solo (Campanharo et al., 2021). Embora os valores ideais possam variar conforme o tipo de solo, a recomendação geral é que os valores devem estar abaixo de 2,5 MPa para assegurar o crescimento saudável das plantas, pois acima desse valor as raízes das plantas começam a sofrer maiores dificuldades para a penetração no solo, sendo considerado que o solo está em estado crítico à penetração das raízes (Canarache, 1990; Campos; Alves, 2008; Moraes *et al.*, 2014).

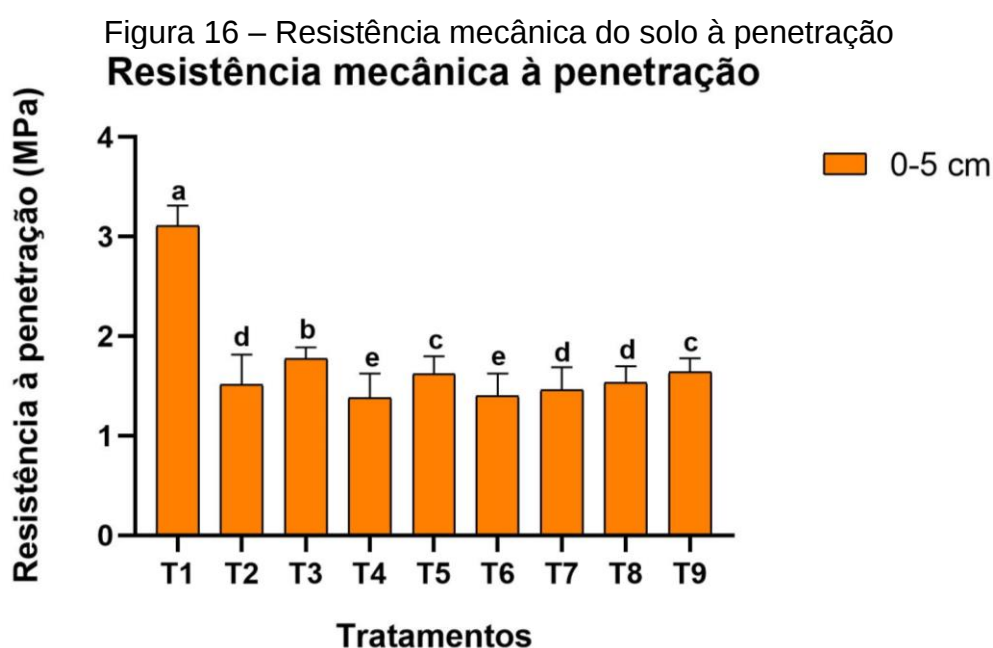
A resistência mecânica à penetração foi avaliada apenas na camada de 0,00-0,05 m, pois, a compactação e resistência à penetração estavam altos o suficiente para provocar grande dificuldade da utilização do penetrômetro no solo, não atingindo camadas mais profundas.

Houve diferença significativa entre o T1 e os demais tratamentos, cerca de 100% a mais de resistência mecânica à penetração (Figura 16), T1 apresentou o maior nível de resistência à penetração (RP), 3,11 MPa, se encontrando em uma faixa muito crítica de RP. Correlacionando esse dado com a densidade do solo, também mais alta, $1,6 \text{ g cm}^{-3}$, demonstra um nível alto de compactação do solo. Dessa forma, é possível afirmar que implementação de diferentes práticas de manejo, em outros tratamentos, foram importantes para melhorar a permeabilidade do solo. Segundo Gabriel *et al.* (2021), solos descobertos são mais vulneráveis à formação de crostas e ao impacto da água no solo, de forma geral, estão menos protegidos, o que aumenta a RP do solo.

Além disso, também foi observado que todos os tratamentos com a adição de adubos verdes apresentaram uma melhora desse parâmetro físico quando comparado ao solo mobilizado, cerca de 15% a menos de resistência à penetração, indicando a importância da vegetação na recuperação e reestruturação do solo. Resultados de

estudos concluíram que culturas de cobertura ajudam a reduzir a resistência do solo à penetração (Bonini e Alves, 2011; Gabriel *et al.*, 2021).

Na Figura 16 é destacado que T4 e T6 foram mais eficientes em reduzir a resistência à penetração em comparação com os demais, alcançando valores de 1,38 e 1,4 MPa, respectivamente, indicando a importância da mucuna-preta na diminuição da resistência à penetração. A mucuna possui enraizamento profundo, mesmo em solos mais degradados, o que contribui para a penetração das raízes e descompactação do solo (Dissanayaka *et al.*, 2024).



Fonte: elaborado pela autora.

Legenda: Resistência mecânica à penetração (profundidade de 0-5cm) em relação aos diferentes manejos para recuperação de solos degradados. T1 – SE: Solo exposto (Controle) - sem técnica de recuperação; T2 – MA: Vegetação nativa de Cerrado (Controle); T3 – SM: Solo mobilizado (vegetação espontânea); T4 – MP: Mucuna-preta (*Stizolobium aterrium* Piper & Tracy); T5 – G/P: Guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) até 1994, após substituído por Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC); T6 – MP+C: Mucuna-preta + Calcário; T7 – G/P+C: Calcário + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco; T8 – MP+C+Ge: Mucuna-preta + Calcário + Gesso; T9 – G/P+C+Ge: Calcário + Gesso + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco. Os valores são expressos como média $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas diferem-se segundo o teste Scott Knoop (5%).

5.2 Umidade gravimétrica do solo

A umidade gravimétrica do solo desempenha um papel crucial na eficácia dos esforços de restauração ambiental. Ela está diretamente ligada ao estabelecimento e

crescimento da vegetação, influencia a biodiversidade e o ecossistema do solo, e desempenha um papel essencial na prevenção da erosão (Dobriyal *et al.*, 2012).

Esse parâmetro está diretamente ligado a um outro parâmetro, a resistência mecânica à penetração e para avaliação conjunta desses parâmetros, a umidade do solo deve estar abaixo de sua capacidade de campo, para uma leitura adequada (Neiro *et al.*, 2003; Campos; Alves, 2008).

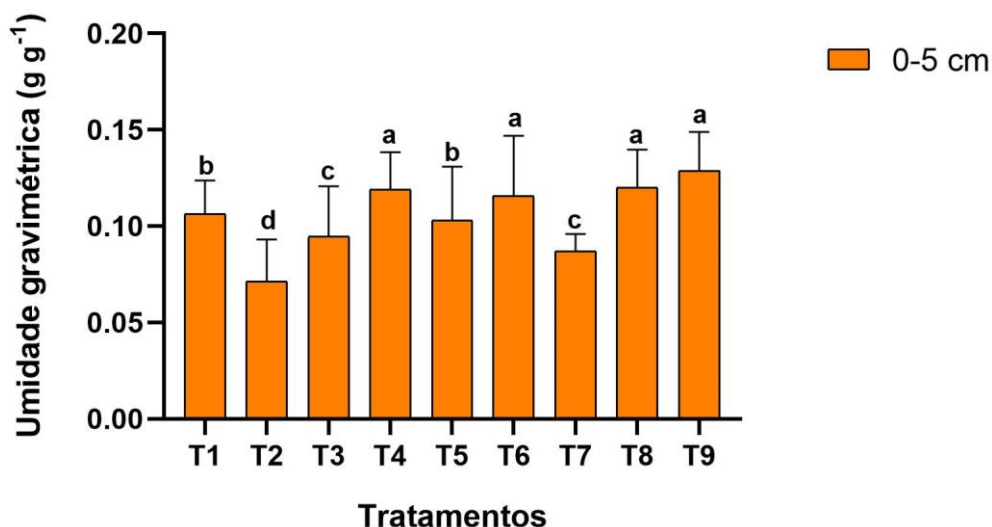
A umidade gravimétrica do solo é relacionada à resistência mecânica à penetração do solo, dessa forma, este parâmetro também foi avaliado apenas na camada de 0,00-0,05 m.

Muitas das estratégias de manejo contendo adubação verde, principalmente as quais continham mucuna-preta – T4, T6, T8 e T9, respectivamente 0,119, 0,116, 0,120 e 0,129 g.g⁻¹ - foram significativamente superiores em incrementar a umidade gravimétrica comparado ao solo mobilizado, 0,106 g.g⁻¹ (Figura 17).

A incorporação de mucuna-preta resultou em valores superiores de umidade gravimétrica, destacando o potencial dessa estratégia na recuperação de áreas degradadas (Figura 17). A mucuna, como adubo verde, produz significativas quantidades de biomassa devido ao seu hábito de crescimento e ao espalhamento de suas raízes superficiais, impactando diretamente a camada de 0,00-0,05 m de profundidade (Freidenreich *et al.*, 2022) (Figura 17).

Das estratégias de manejo com adubação verde com feijão guandu/feijão de porco, o T9 obteve resultado semelhante estatisticamente às estratégias com mucuna. Observou-se que a combinação de práticas de calagem e gessagem com feijão guandu/feijão de porco aumentou em mais de 80% a umidade gravimétrica do solo em comparação com o solo controle (vegetação nativa) (Figura 17).

Figura 17 – Umidade gravimétrica do solo
Umidade Gravimétrica do solo



Fonte: elaborado pela autora.

Legenda: Umidade gravimétrica (profundidade de 0-5cm) em relação aos diferentes manejos para recuperação de solos degradados. T1 – SE: Solo exposto (Controle) - sem técnica de recuperação; T2 – MA: Vegetação nativa de Cerrado (Controle); T3 – SM: Solo mobilizado (vegetação espontânea); T4 – MP: Mucuna-preta (*Stizolobium aterrium* Piper & Tracy); T5 - G/P: Guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) até 1994, após substituído por Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC); T6 – MP+C: Mucuna-preta + Calcário; T7 – G/P+C: Calcário + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco; T8 – MP+C+Ge: Mucuna-preta + Calcário + Gesso; T9 – G/P+C+Ge: Calcário + Gesso + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco. Os valores são expressos como média $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas diferem-se segundo o teste Scoot Knoop (5%).

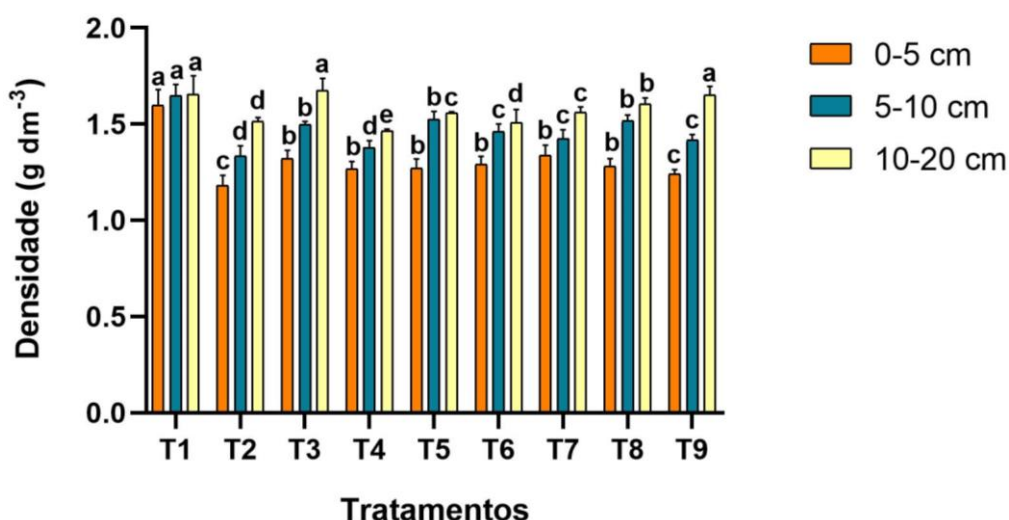
5.3 Densidade do solo

A densidade do solo é um parâmetro fundamental para avaliar a qualidade física do solo, sendo um indicador direto de sua compactação. Ela é influenciada por processos naturais e pedogenéticos, mas a intervenção humana, com gestão da terra e das culturas, desempenha um papel crucial na alteração desse parâmetro (Haruna *et al.*, 2020). Para um solo de textura franco-argilosa, a densidade de solo se encontra entre 1,4 - 1,5g/cm³, acima disso é caracterizado como uma densidade crítica, a qual dificulta ou até impede o crescimento e desenvolvimento de raízes. Cada solo possui uma densidade crítica, e o principal fator determinante é sua classe (Rosenberg, 1964; Cintra; Mielniczuk, 1983; Reichert; Reinert; Braida, 2023).

Conforme esperado, o tratamento T1 resultou nas maiores densidades em todas as profundidades avaliadas 1,597, 1,647 e 1,655 g dm⁻³, respectivamente, enquanto o tratamento T2 apresentou as menores densidades nas camadas de 0,00-

0,05 m e 0,05-0,10 m, 1,182 e 1,334 g. dm⁻³ (Figura 18). Isso acontece porque a remoção da cobertura vegetal nativa não apenas resulta em perda de fertilidade do solo, mas também aumenta significativamente a vulnerabilidade do solo a compactação superficial mais intensa, o que, por sua vez, contribui para o aumento da densidade (Carvalho *et al.*, 2017).

Figura 18 – Densidade do solo
Densidade do solo



Fonte: elaborado pela autora.

Legenda: Densidade do solo em diferentes profundidades (0-5, 5-10, 10-20 cm) em relação aos diferentes manejos para recuperação de solos degradados. T1 – SE: Solo exposto (Controle) - sem técnica de recuperação; T2 – MA: Vegetação nativa de Cerrado (Controle); T3 – SM: Solo mobilizado (vegetação espontânea); T4 – MP: Mucuna-preta (*Stizolobium aterrimum* Piper & Tracy); T5 – G/P: Guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) até 1994, após substituído por Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC); T6 – MP+C: Mucuna-preta + Calcário; T7 – G/P+C: Calcário + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco; T8 – MP+C+Ge: Mucuna-preta + Calcário + Gesso; T9 – G/P+C+Ge: Calcário + Gesso + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco. Os valores são expressos como média ± desvio padrão. Letras minúsculas distintas diferem-se segundo o teste Scott Knoop (5%).

O tratamento T9 demonstra-se como uma opção eficaz para reduzir a densidade do solo na profundidade de 0,00-0,05 m, com 1,240 g.dm⁻³, não diferindo do T2 e reduzindo a densidade do solo em cerca de 7% comparado ao tratamento com solo mobilizado (T3). No entanto, para as camadas de 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m, o tratamento T4 se destaca, com 1,379 e 1,466 g.dm⁻³, por não apresentar diferenças significativas em relação ao tratamento T2 na profundidade de 0,05-0,10 m, além de reduzir significativamente a densidade do solo em comparação com o mesmo tratamento na profundidade de 0,10-0,20 m (Figura 18). Esse tratamento (T4) já foi reconhecido como eficaz na mesma área em estudos anteriores (Bonini e Alves,

2011), mostrando uma alteração na densidade do solo após 17 anos, mantendo-se estável até os dias atuais.

A intervenção com o cultivo de mucuna pode ser uma opção interessante, pois é uma leguminosa com raízes de diâmetro maior e mais profundas que as raízes das gramíneas. Ela é especialista na formação de bioporos, podendo atingir camadas mais profundas do solo, até 60 cm, expandindo-se para além da camada superficial (Nagumo; Issaka; Hoshikawa, 2006; Soares *et al.*, 2021).

5.4 Estabilidade de agregados (via úmida)

Partículas sólidas do solo estão organizadas em arranjo, formando a estrutura do solo. A organização desses sólidos em unidades maiores forma os agregados, pelo processo de agregação, tendo tamanhos, formas e graus variados de estabilidade de acordo com as forças de coesão e adesão nos pontos de contato das partículas sólidas (Lepsch, 2021). A qualidade do solo está diretamente ligada aos seus agregados, influenciando a infiltração, retenção de água e resistência às raízes, e está correlacionada com a erodibilidade do solo (Souza *et al.*, 2024). A estabilidade dos agregados indica o quão bem eles estão mantidos no solo. Manter uma alta estabilidade é crucial para preservar a produtividade, reduzir a erosão e a degradação ambiental (Amézketa, 1999).

Parâmetros para medir a qualidade dos agregados são o diâmetro médio ponderado (DMP) e o índice de estabilidade de agregados (IEA). O DMP é uma estimativa da quantidade relativa de solo em diferentes classes ou tamanho de agregados, sendo expresso em milímetros e ele aumenta conforme a porcentagem de agregados maiores aumenta, o que é desejável, pois agregados de diâmetro maiores em quantidade no solo sinaliza mais estabilidade e interfere positivamente em outros parâmetros de qualidade do solo (infiltração e drenagem de água e são mais resistentes à erosão hídrica). Já o IEA mede a estabilidade da agregação do solo, variando entre 0 e 100%. É interessante que esse índice esteja na faixa de 70% para mais, indicando maior estabilidade de agregados (Castro Filho e Logan, 1991; Castro Filho, Muzilli e Podanoschi, 1998; Castro Filho *et al.*, 2002).

A estabilidade dos agregados é um fator crucial no controle da erosão hídrica em solos tropicais ácidos, uma vez que a erodibilidade do solo está diretamente

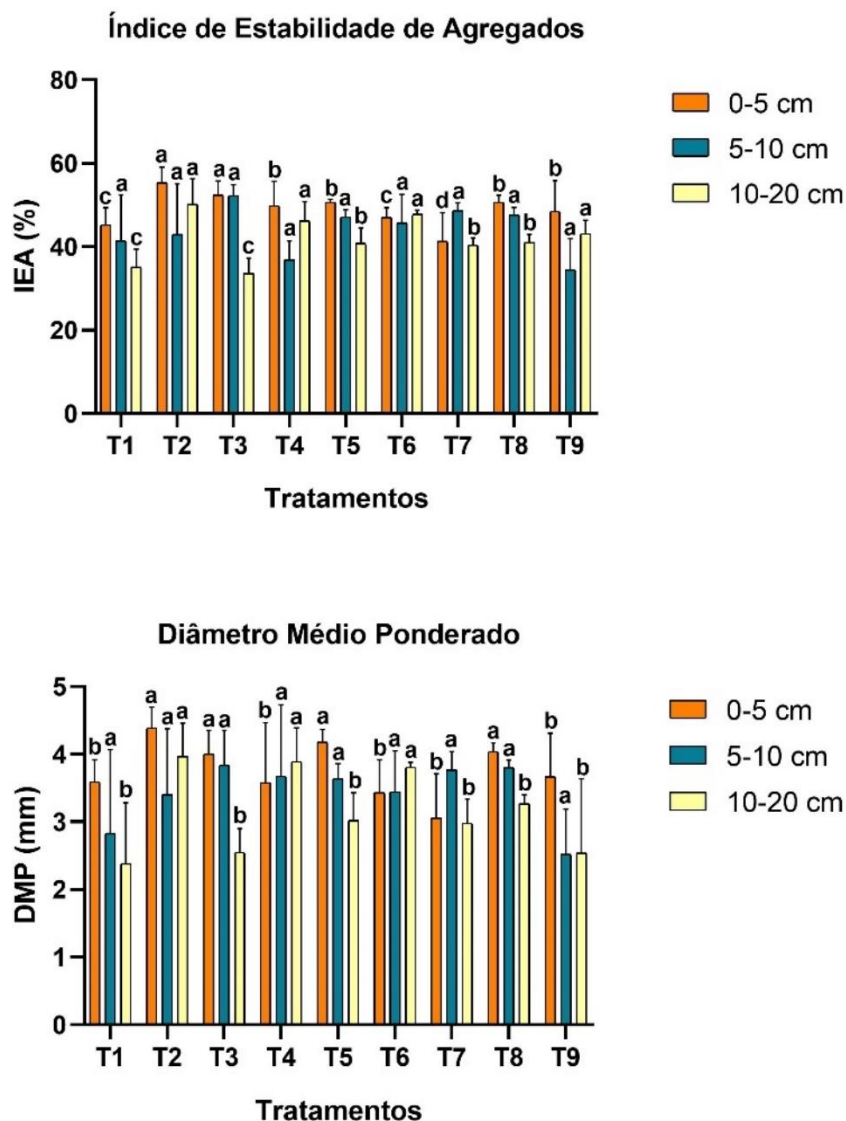
relacionada à sua capacidade de manter os agregados estáveis na presença de água. A preservação de poros maiores no solo, que promovem elevadas taxas de infiltração e aeração, depende diretamente dessa estabilidade. Além disso, a agregação do solo e sua estabilidade favorecem o sequestro e acúmulo de carbono no solo, da mesma forma, uma degradação estrutural do solo leva à perda de matéria orgânica e carbono. (Kemper; Rosenau, 1986; Roth *et al.*, 1986; Castro Filho; Logan, 1991; Lal; Kimble; Follett, 1997; Castro Filho; Muzilli; Podanoschi, 1998).

Não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos avaliados para diâmetro médio ponderado (DMP) e índice de estabilidade de agregados (IEA) a uma profundidade de 0,05-0,10 m. Com relação a profundidade de 0,00-0,05 cm, os tratamentos T2, T3, T5, T8 resultaram em maior DMP, com médias de 4,39, 4,0, 4,18 e 4,04 mm, respectivamente. Entretanto, somente T2 e T3 alcançaram os maiores índices de IEA (55,36% e 52,37%) nesta profundidade (Figura 19a). Isso se deve à maior vulnerabilidade da camada superficial (0,00-0,05 m) aos agentes desestabilizadores, como a erosão hídrica e eólica, que podem facilitar a destruição dos agregados (Chappell *et al.*, 2019; Nijs; Cammeraat, 2020).

Para a profundidade de 10-20 cm, os tratamentos T2, T4 e T6 mostraram as maiores médias de DMP, 3,97, 3,89 e 3,81 mm, respectivamente, e maiores médias de IEA, 50,14, 46,20 e 47,79%, respectivamente, além do T9 também ser igual estatisticamente, com 43,18% (Figura 19a e 19b). As plantas de cobertura, como mucuna, guandu e feijão de porco, tendem a acumular uma grande quantidade de resíduos vegetais na superfície do solo (Nagumo; Issaka; Hoshikawa, 2006). Isso proporciona um substrato ideal para a atividade microbiana, que desempenha um papel crucial no aumento do DMP e do IEA (Han *et al.*, 2021), possivelmente sendo os principais contribuintes para a formação desses agregados em subsuperfície após 30 anos de práticas de recuperação (Figura 19a e 19b). Estudos de longo prazo em áreas recuperadas mostraram que o uso de plantas de cobertura resulta em maior estabilidade dos agregados (Silva *et al.*, 2016), corroborando com nosso estudo.

A MOS é um importante fator para formação dos agregados no solo e sua estabilidade dos agregados (Dutartre *et al.*, 1993; Gijsman, 1996), nesse sentido, como o teor de MOS se encontra em nível baixo, o DMP e o IEA também obtiveram valores abaixo dos ideais.

Figura 19 – Diâmetro médio ponderado e Índice de estabilidade de agregados do solo



Fonte: elaborado pela autora.

Legenda: a) Diâmetro médio ponderado de agregados do solo em diferentes profundidades (0-5, 5-10, 10-20 cm) em relação aos diferentes manejos para recuperação de solos degradados. b) Índice de Estabilidade de Agregados do solo, em diferentes profundidades (0-5, 5-10, 10-20 cm) em relação aos diferentes manejos para recuperação de solos degradados. T1 – SE: Solo exposto (Controle) - sem técnica de recuperação; T2 – MA: Vegetação nativa de Cerrado (Controle); T3 – SM: Solo mobilizado (vegetação espontânea); T4 – MP: Mucuna-preta (*Stizolobium aterrium* Piper & Tracy); T5 – G/P: Guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) até 1994, após substituído por Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC); T6 – MP+C: Mucuna-preta + Calcário; T7 – G/P+C: Calcário + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco; T8 – MP+C+Ge: Mucuna-preta + Calcário + Gesso; T9 – G/P+C+Ge: Calcário + Gesso + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco. Os valores são expressos como média $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas diferem-se segundo o teste Scott Knoop (5%).

5.5 Infiltração de água no solo

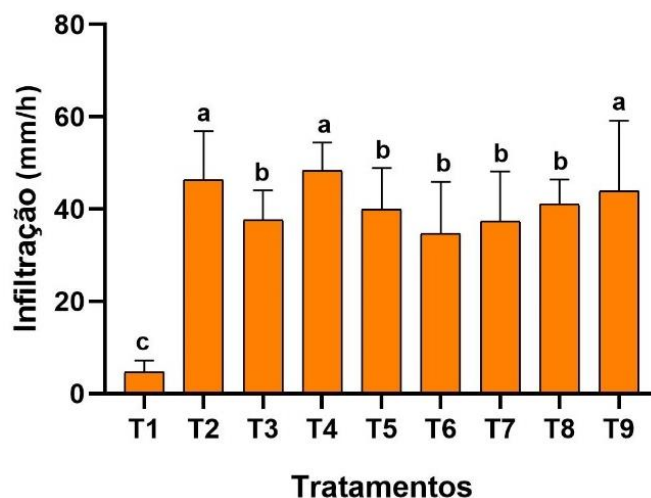
A taxa de infiltração de água é uma propriedade hidrológica do solo que impacta diretamente no regime de escoamento, lixiviação, erosão do solo e disponibilidade de água para plantas e águas subterrâneas. Esta é afetada por condições regionais, como topografia e locais como umidade do solo, conteúdo de matéria orgânica, mineralogia, textura, estrutura e compactação do solo (Francos *et al.*, 2023). Valores acima de 25 mm/h são considerados ótimos para essa classe de textura do solo (argila franca) (Brandão *et al.*, 2006).

Os resultados demonstram grande diferença do solo exposto (T1) para os demais tratamentos, com a menor taxa de infiltração de água no solo de 4,64 mm h⁻¹, representando ser cerca de 90% menor que os demais tratamentos (Fig. 5). Este resultado indica forte compactação do subsolo que não foi submetido a nenhuma intervenção após sofrer acentuada degradação. Os manejos do solo que adotam culturas de cobertura para recuperar áreas degradadas incrementam a taxa de infiltração de água no solo, tornando o solo um habitat favorável para o desenvolvimento da vegetação (Basche; DeLonge, 2019).

Com relação as diferentes estratégias com vegetação para recuperar o solo, T2, T4 e T9 apresentaram as maiores médias de infiltração, com 46,38, 48,37 e 43,98 mm h⁻¹, respectivamente (Figura 20). Pressupõem-se que a aplicação de práticas de calagem e gessagem possam melhorar a infiltração do solo combinada com o manejo de feijão guandu/feijão de porco para recuperação de áreas degradadas. A aplicação de calcário e gesso fornece Ca, macronutriente relevante, que gera no solo uma condição física que permite uma melhor absorção de nutrientes, infiltração e aeração, proporcionando uma recuperação de solos degradados (Anikwe; Eze; Ibudialo, 2016).

Os resultados mostram que a aplicação desses condicionantes só é eficaz quando combinada com o cultivo de guandu e feijão de porco, maximizando o potencial da gessagem e calagem. O mesmo não ocorre com tratamentos com mucuna, supõe-se que isso seja devido ao sistema radicular da mucuna ser mais robusto em comparação com o feijão de porco, auxiliando na infiltração de água no solo independente da gessagem e calagem (Dissanayaka *et al.*, 2024).

Figura 20 – Infiltração de água do solo
Infiltração de água no solo



Fonte: elaborado pela autora.

Legenda: Infiltração de água do solo em relação aos diferentes manejos para recuperação de solos degradados. T1 – SE: Solo exposto (Controle) - sem técnica de recuperação; T2 – MA: Vegetação nativa de Cerrado (Controle); T3 – SM: Solo mobilizado (vegetação espontânea); T4 – MP: Mucuna-preta (*Stizolobium aterrium* Piper & Tracy); T5 – G/P: Guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) até 1994, após substituído por Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC); T6 – MP+C: Mucuna-preta + Calcário; T7 – G/P+C: Calcário + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco; T8 – MP+C+Ge: Mucuna-preta + Calcário + Gesso; T9 – G/P+C+Ge: Calcário + Gesso + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco. Os valores são expressos como média $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas diferem-se segundo o teste Scott Knot (5%).

A estratégia de utilizar gramíneas como cobertura vegetal desde 1999 nos tratamentos de recuperação de solo tem trazido benefícios para as características físicas do solo, como evidenciado em um estudo anterior realizado por Bonini e Alves (2011). No presente estudo, esses benefícios ainda são notáveis, por exemplo, ao compararmos as médias de umidade gravimétrica das diferentes estratégias de manejo ($0,109 \text{ g.g}^{-1}$) com o tratamento T2 ($0,071 \text{ g.g}^{-1}$), observamos uma maior umidade nas parcelas com braquiária (Figura 17).

O mesmo padrão é observado para resistência à penetração, onde o tratamento T2 apresenta maior resistência ($1,51 \text{ MPa}$) em comparação com os tratamentos com plantio de gramíneas ($0,071 \text{ MPa}$) (Figura 16). As gramíneas *Urochloa* são amplamente reconhecidas como espécies importantes na recuperação de solos brasileiros, devido ao seu extenso sistema radicular, crescimento rápido e contínuo (Marchini *et al.*, 2015). Estudos de longo prazo de recuperação de áreas degradadas também demonstram que o uso dessas gramíneas promove uma melhor estruturação e melhoria das características físicas do solo (Miguel *et al.*, 2023), o que está em concordância com nossos resultados.

5.6 Potencial hidrogeniônico (pH) e Acidez potencial

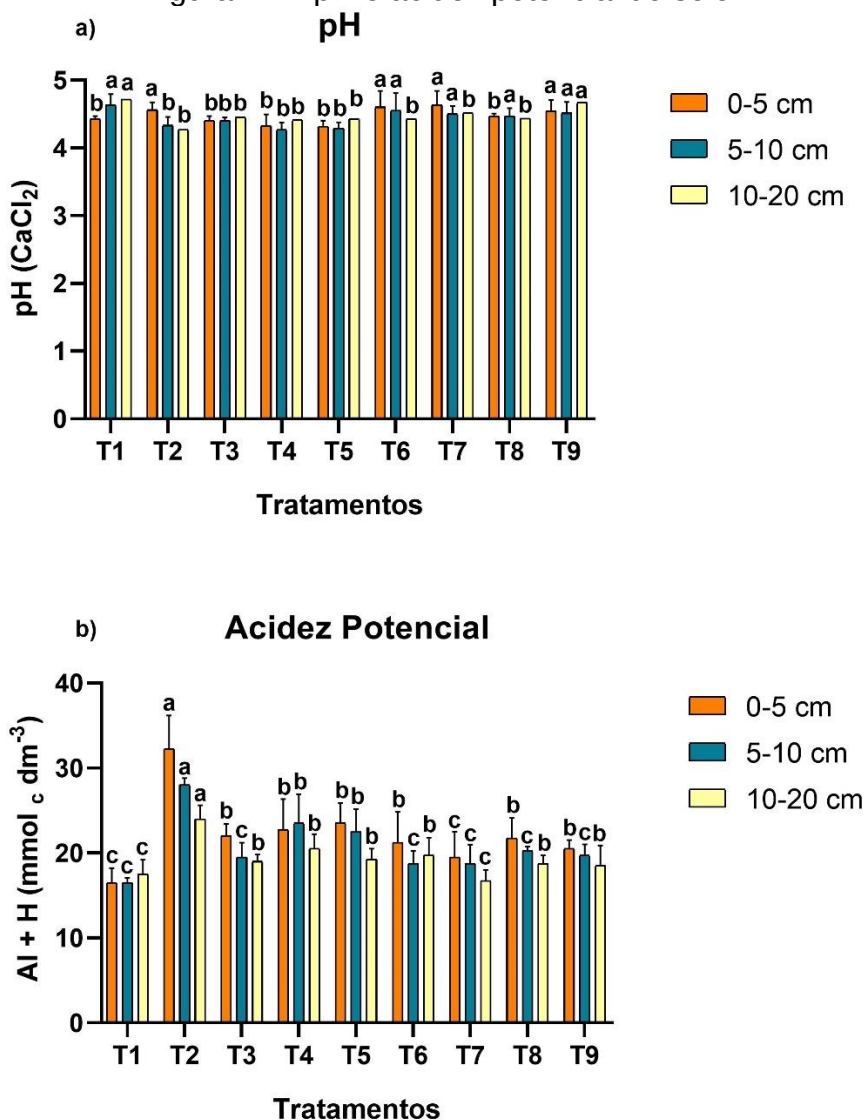
Em todas as camadas estudadas o pH dos tratamentos, de recuperação e controles, agiu de forma semelhantes, porém ainda foi possível observar alguma diferença estatística entre os tratamentos (Figura 21a). Entre os tratamentos com correção do solo (T6 a T9), as camadas de 0-5 cm e 5-10 cm apresentaram pH superiores estatisticamente comparados aos tratamentos de recuperação sem calagem, com exceção do T8 na primeira camada (Figura 21a).

Solos de cerrado são ligeiramente ácidos, por esse motivo tratamentos com correção de solo, em geral, apresentaram maiores valores de pH que o T2 (vegetação nativa do cerrado). Esse resultado foi encontrado anteriormente em trabalhos realizados no mesmo local, de acordo com resultados encontrados por Bonini (2012) e Lourencetti (2023).

Conforme a semelhança de pH apontada entre os tratamentos é indicada nova aplicação de calagem, visto que a última aplicação foi realizada em 1996 e seu efeito quase não se reflete nos resultados atuais.

Em relação aos resultados encontrados para $H + Al$, houve diferença significativa em todas as camadas do solo estudadas, como é possível observar na Figura 21b. Em todas as camadas, os tratamentos de recuperação apresentaram valores menores de $H + Al$ que o solo de mata (T2). Este tratamento se diferenciou significativamente dos demais tratamentos e apresentou os maiores valores de $H + Al$, com 32,25, 28 e 24 $mmol_c\ dm^{-3}$ nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Bonini (2012) encontrou resultados parecidos em seu trabalho, no qual o solo de mata também apresentou os maiores valores de $H + Al$ em todas as camadas estudadas.

Figura 21 – pH e acidez potencial do solo



Fonte: elaborada pela autora.

Legenda: a) pH do solo; e b) H + Al do solo, em profundidades diferentes (0-5, 5-10, 10-20 cm), em relação aos diferentes manejos para recuperação de solos degradados. T1 – SE: Solo exposto (Controle) - sem técnica de recuperação; T2 – MA: Vegetação nativa de Cerrado (Controle); T3 – SM: Solo mobilizado (vegetação espontânea); T4 – MP: Mucuna-preta (*Stizolobium aterrium* Piper & Tracy); T5 - G/P: Guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) até 1994, após substituído por Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC); T6 – MP+C: Mucuna-preta + Calcário; T7 – G/P+C: Calcário + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco; T8 – MP+C+Ge: Mucuna-preta + Calcário + Gesso; T9 – G/P+C+Ge: Calcário + Gesso + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco.

Os valores são expressos como média $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas diferem-se segundo o teste Scott Kroot (5%).

5.7 Cálcio, Magnésio, Fósforo e Potássio

De acordo com os resultados do teor de cálcio, os tratamentos que mais se destacaram foram de T6, T7, T8 e T9, os quais obtiveram os maiores valores na primeira camada do solo (0-5 cm), com 7,25, 7,40, 7,11 e 6,8 mmolc dm⁻³,

respectivamente (Figura 22a). Todos esses tratamentos receberam calcário como um dos manejos adotados, o que reflete a importância da calagem para elevar o teor de Ca na camada mais superficial do solo (Raij *et al.*, 2001; Cantarella *et al.*, 2022).

Segundo Raij *et al.*, 2001 a calagem atua na camada superficial do solo, equilibra o pH, diminuindo a acidez do solo, neutraliza alumínio e manganês tóxicos, fornece cálcio e magnésio, aumenta disponibilidade de fósforo e molibdênio.

Além do calcário, a mucuna-preta também teve sua importância no teor de Ca do solo, como é possível ser observado no tratamento T6, com valores mais altos em todas as camadas do solo, com 7,68 na camada de 5-10 cm e 6,11 mmol_c dm⁻³ de 10-20 cm (Figura 22a). Um estudo realizado por Alves e Souza (2008) na mesma área corrobora com esse dado, no qual a mucuna-preta apresentou maior valor de cálcio, segundo o estudo isso ocorre devido a maior eficiência da mucuna-preta em reciclar Ca do solo (Alves; Souza, 2008). Algumas leguminosas auxiliam na correção da acidez do solo e são eficientes na extração de alguns nutrientes, como Ca, P e K (Magalhães *et al.*, 1991; Hunter *et al.*, 1995).

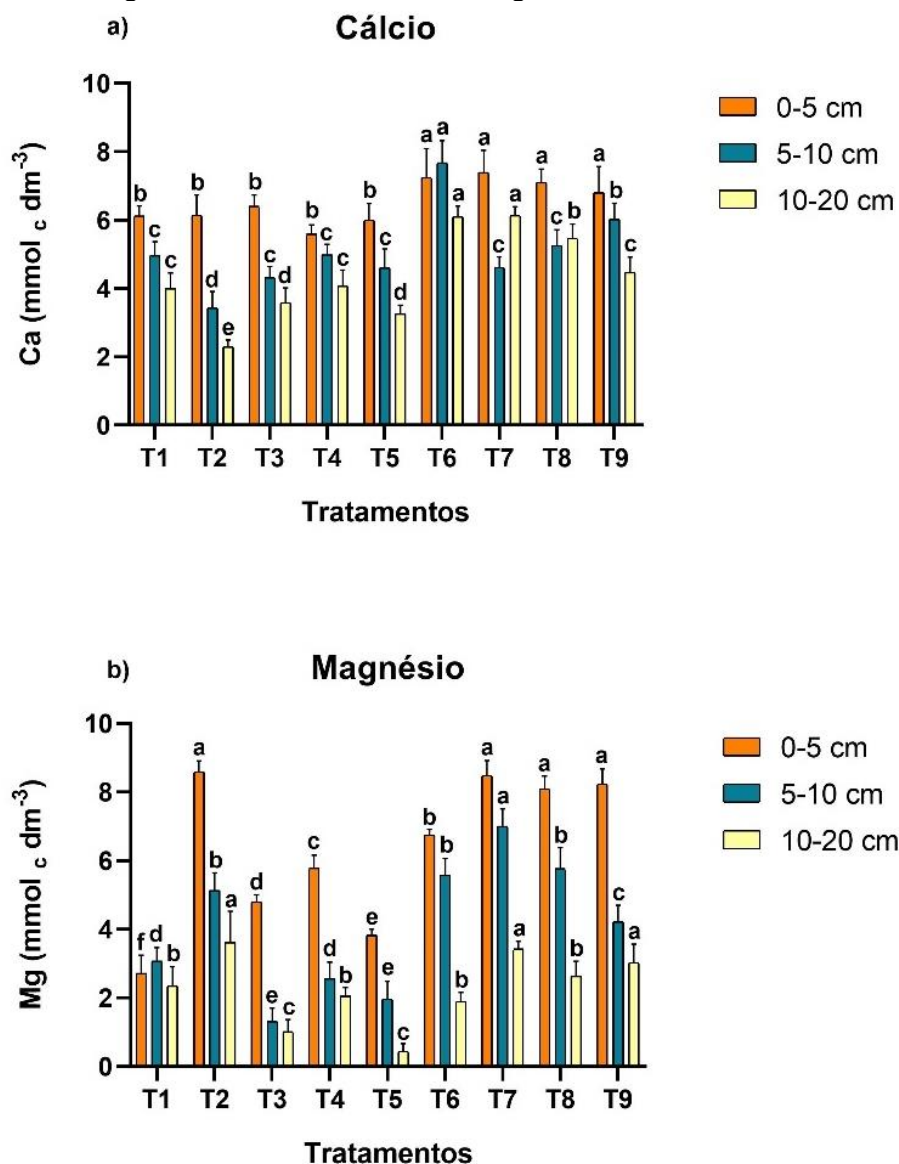
De forma geral, o teor de Ca do solo estudado se enquadra como médio (4 a 7 mmol_c dm⁻³) de acordo com Raij *et al.* (1997). Os tratamentos sem aplicação de calcário obtiveram valores mais baixos de Ca (Figura 22a), evidenciando a importância desse manejo para elevar o teor desse nutriente (Raij *et al.*, 2001).

Em relação ao teor de magnésio, os tratamentos com os maiores teores e iguais estatisticamente foram o solo de mata (T2) com 8,60 mmol_c dm⁻³, T7, T8 e T9, com 8,48, 8,1 e 8,23 mmol_c dm⁻³ na camada de 0-5 cm. O T6 foi estatisticamente diferente destes, porém pouco abaixo, com 6,74 mmol_c dm⁻³ e se diferenciou dos demais tratamentos os quais apresentaram valores menores de Mg. Na camada de 5-10 cm, o T7 foi superior aos demais tratamentos e na camada de 10-20 cm, não se diferenciou do T9 e T2 (Figura 22b).

O T7 foi o tratamento que mais se destacou com os valores mais significantes de Mg em todas as camadas, indicando a benefícios do guandu/feijão-de-porco e calcário para o teor de magnésio no solo. Estudando a performance de plantas leguminosas para sistema de plantio direto, Aker e Passos (2018) encontraram resultados onde o plantio de feijão-de-porco incrementou teores de magnésio foliar no milho. Outro experimento observando níveis de nutrientes no solo com alguns adubos verdes obtiveram o resultado de que o tratamento com crotalária e guandu elevou o teor de magnésio no solo (Faria; Costa; Faria, 2007).

É possível observar a influência do calcário para o teor de magnésio na camada superficial nos tratamentos T6, T7, T8 e T9 e como ele aumenta esse nutriente. Isso ocorre, pois, a calagem entre outras funções, também fornece magnésio ao solo (Raij *et al.*, 2001). Em estudos anteriores na mesma área experimental também foi observado o incremento do teor de magnésio pela aplicação de calcário no solo, principalmente em camadas superficiais (Alves, 2001; Alves e Souza, 2008; Andrade Júnior, 2004). De forma geral, o teor de magnésio do solo estudado se enquadra como baixo ($< 5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) ou médio ($5\text{-}8 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) de acordo com Cambarella *et al.* (2022).

Figura 22 – Teor Cálcio e Magnésio do solo



Fonte: elaborado pela autora.

Legenda: a) Teor cálcio e b) teor de magnésio do solo, em profundidades diferentes (0-5, 5-10, 10-20 cm), em relação aos diferentes manejos para recuperação de solos degradados. T1 – SE: Solo exposto (Controle) - sem técnica de recuperação; T2 – MA: Vegetação nativa de Cerrado (Controle); T3 – SM: Solo mobilizado (vegetação espontânea); T4 – MP: Mucuna-preta (*Stizolobium aterrium* Piper & Tracy); T5 - G/P: Guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) até 1994, após substituído por Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC); T6 – MP+C: Mucuna-preta + Calcário; T7 – G/P+C: Calcário + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco; T8 – MP+C+Ge: Mucuna-preta + Calcário + Gesso; T9 – G/P+C+Ge: Calcário + Gesso + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco. Os valores são expressos como média $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas diferem-se segundo o teste Scoot Knoop (5%).

Entre os resultados de fósforo (P), o tratamento que apresentou diferença expressiva em relação aos demais foi o T2, sendo maior em todas as profundidades, com 7,38, 6,28 e 2,77 g dm⁻³ na primeira, segunda e terceira profundidade, respectivamente (Figura 23a). De acordo com Liu *et al.* (2023) a diversidade de

plantas está relacionada com a disponibilidade de fósforo no solo e diversidade bacteriana do solo. Além disso, a mineralização da matéria orgânica pode influenciar positivamente na disponibilidade de P no solo (Cantarella, 2022).

Todas as técnicas de restauração, de T4 a T9, foram superiores ao T1 na camada de 0-5 cm e exceto os tratamentos T6 e T7, os demais tratamentos com adubação verde também obtiveram diferença significativa em relação ao T1 na camada de 5-10 cm (Figura 23a). Isso possivelmente ocorre pois latossolos geralmente são baixos em P e espécies de adubação verde podem incrementar o teor de vários nutrientes no solo, entre eles o fósforo. (Lima, 2023). Adubos verdes também podem otimizar a disponibilidade de P no solo por estimular o desenvolvimento de microrganismos que ajudam na liberação de enzimas solubilizadoras de fosfatos (Carneiro *et al.*, 2004; Lima Filho, 2023).

Os teores de fósforo encontrados no presente trabalho são considerados baixos (5-15) ou muito baixos (< 5) para as culturas perenes, segundo Cantarella *et al.* (2022). Os Latossolos, que representam 46% das classes dos solos do bioma Cerrado naturalmente apresentam baixa disponibilidade de fósforo (P) em seus solos (Lima Filho, 2023).

Em relação ao teor de potássio (K) no solo, a mata também apresentou os maiores níveis em todas as profundidades, sendo $1,17 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0-5 cm, $0,84 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 5-10 cm e $0,62 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 10-20 cm (Figura 23b). Durante estudos de Bonini (2012), resultados de teor de potássio do ano de 2011 corroboram com os resultados atuais, visto que o tratamento com solo de vegetação nativa obteve os maiores resultados na camada de 0-10 cm e 10-20 cm.

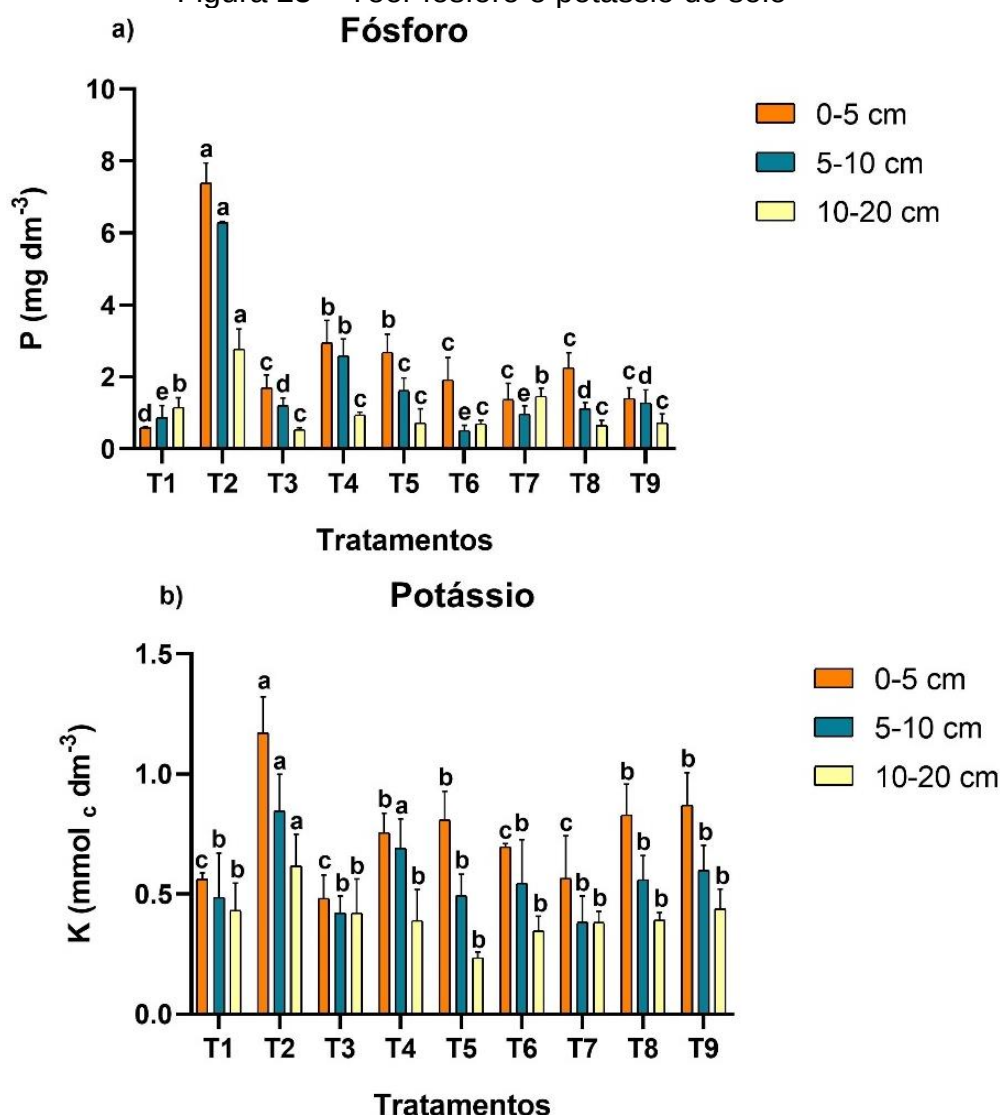
Manejos somente com adubos verdes (T4 e T5) e adubos verdes + calcário + gesso (T8 e T9) elevaram o teor de potássio na profundidade de 0-5 cm e foram diferentes estatisticamente comparado a T1 (solo exposto) e T3 (solo mobilizado). Na camada de 5-10 cm, o tratamento com mucuna (T4) não se diferenciou estatisticamente do solo de mata (T2), tendo um teor de K de $0,69 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Figura 23b).

O potássio (K) apresenta rápida liberação de resíduos vegetais, por não está associado a nenhum componente estrutural do tecido vegetal (Marschner, 1995). Dessa forma, tratamentos com vegetação apresentara maiores teores de K, além disso, a vegetação nativa apresenta maior volume e diversidade de resíduos vegetais, com muita serrapilheira, portanto, provavelmente sua ciclagem de nutrientes e

liberação para o solo é maior comparado à solos com adubos verdes, consequentemente, a vegetação nativa apresentou maiores teores de K no solo.

Os teores de potássio encontrados no presente trabalho são considerados baixos (0,8-1,5) ou muito baixos (< 0,8), segundo Cantarella *et al.* (2022).

Figura 23 – Teor fósforo e potássio do solo



Fonte: elaborado pela autora.

Legenda: a) Teor fósforo e b) teor de potássio do solo, em profundidades diferentes (0-5, 5-10, 10-20 cm), em relação aos diferentes manejos para recuperação de solos degradados. T1 – SE: Solo exposto (Controle) - sem técnica de recuperação; T2 – MA: Vegetação nativa de Cerrado (Controle); T3 – SM: Solo mobilizado (vegetação espontânea); T4 – MP: Mucuna-preta (*Stizolobium aterrium* Piper & Tracy); T5 - G/P: Guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) até 1994, após substituído por Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC); T6 – MP+C: Mucuna-preta + Calcário; T7 – G/P+C: Calcário + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco; T8 – MP+C+Ge: Mucuna-preta + Calcário + Gesso; T9 – G/P+C+Ge: Calcário + Gesso + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco.

Os valores são expressos como média $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas diferem-se segundo o teste Scoot Kroot (5%).

5.8 Soma de bases, Capacidade de troca catiônica e Saturação por bases

Observando resultados da SB é possível notar dois comportamentos, os tratamentos com calagem (T6 a T9) e solo de mata (T2), e demais tratamentos de recuperação sem calagem (T3 a T5) e controle com solo exposto (T1). O primeiro agrupamento apresentou maiores valores de SB, com valores em média de $15,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0-5 cm de solo. O segundo agrupamento obteve valores menores de SB, tendo com valores em média $10,96 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0-5 cm (Figura 24a).

A presença da MOem camadas mais superficiais do solo faz com que aumente a disponibilidade de nutrientes nessa camada. Além disso, o comportamento dos tratamentos confirma os atributos químicos do solo estudados, isso ocorre, pois, a aplicação de calcário fornece nutrientes como Ca e Mg, elevando o valor da soma de bases para os tratamentos com calagem (Raij, 2001).

Nos resultados da CTC é possível observar três comportamentos (Figura 24b). Os maiores resultados, nas três camadas estudadas foram observados no T2. O T1 obteve a menor CTC em todas as camadas e os demais tratamentos se mantiveram com valores parecidos de CTC. Resultados muito semelhantes foram encontrados por Bonini (2012) na mesma área de estudo, onde nos anos de 2010 e 2011 a CTC do solo também foi mais alta para solo de mata e mais baixa para o solo exposto.

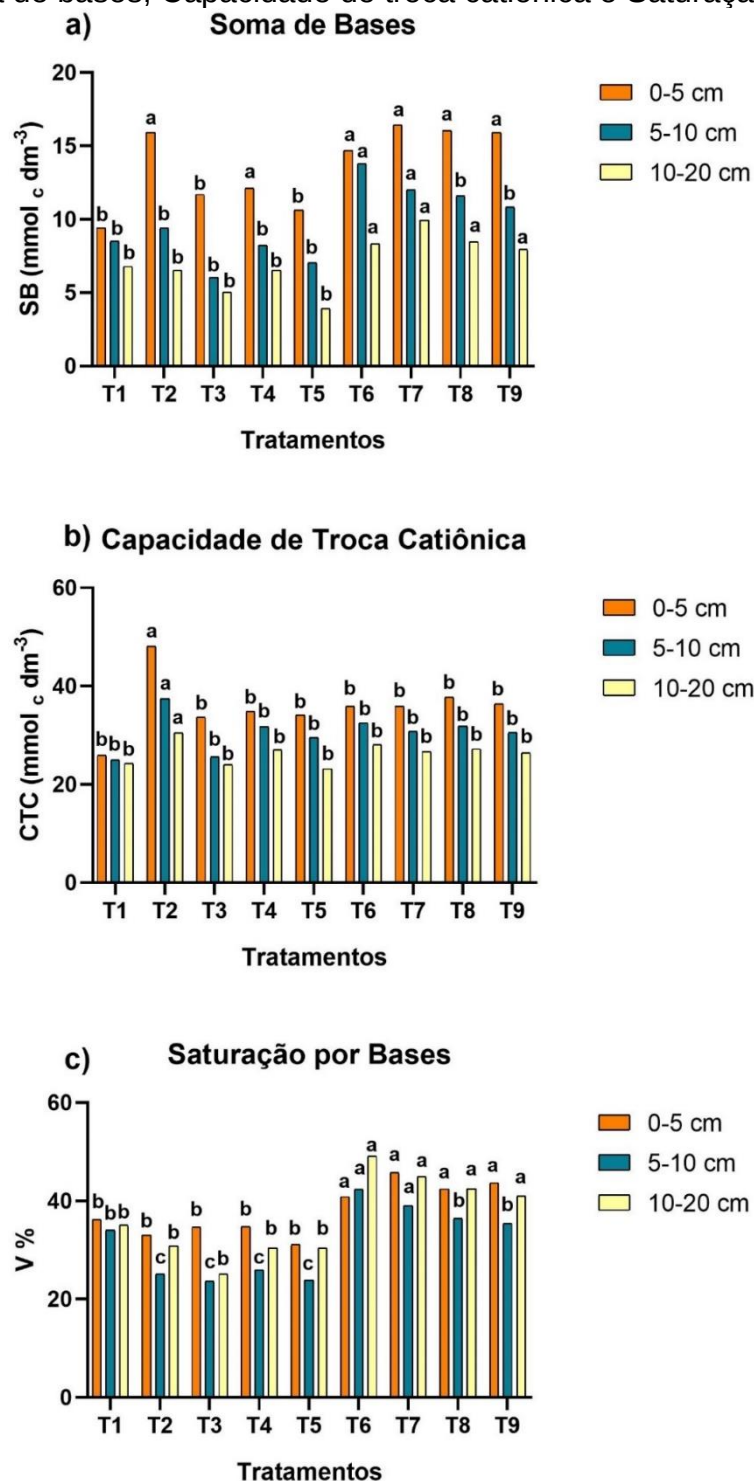
Em resultados da V% é possível observar dois comportamentos entre os tratamentos: tratamentos em que houve aplicação de calagem e que não foi realizada a aplicação (Figura 24c). Em tratamentos sem aplicação de calagem (T1 a T5) o V% apresentou os menores valores em todas as camadas, abaixo de 37% e nos tratamentos os quais receberam calagem (T6 a T9), o V% não ultrapassou 50%, se encontrando aproximadamente de 40% nas três camadas de solo estudadas (Figura 24c). Ambos os casos são caracterizados por saturação por bases baixa (25-50%) segundo Cantarella *et al.*, 2022.

Bonini (2012) obteve resultados parecidos, nos quais os maiores valores foram os tratamentos de recuperação com a presença de calcário. Os resultados do V% se correlacionam com resultados de pH, no qual foi possível observar a necessidade de realizar a correção do solo visto que a última aplicação foi realizada a décadas atrás, em 1996, dessa forma, para obter diferença entre os tratamentos faz-se necessário

essa aplicação nos tratamentos T6 a T9. A aplicação de calcário deve ser feita de acordo com análises químicas para elevar a saturação por bases a 70%.

Resultados semelhantes foram encontrados em pesquisas anteriores nessa mesma área por Lourencetti (2023), no qual foi observado baixo valor de V% e necessidade de nova aplicação de calcário.

Figura 24 – Soma de bases, Capacidade de troca catiônica e Saturação por bases



Fonte: elaborado pela autora.

Legenda: Soma de bases, CTC e Saturação por bases, em profundidades diferentes (0-5, 5-10, 10-20 cm), em relação aos diferentes manejos para recuperação de solos degradados. T1 – SE: Solo exposto (Controle) - sem técnica de recuperação; T2 – MA: Vegetação nativa de Cerrado (Controle); T3 – SM: Solo mobilizado (vegetação espontânea); T4 – MP: Mucuna-preta (*Stizolobium aterrium* Piper & Tracy); T5 - G/P: Guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) até 1994, após substituído por Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC); T6 – MP+C: Mucuna-preta + Calcário; T7 – G/P+C: Calcário + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco; T8 – MP+C+Ge: Mucuna-preta + Calcário + Gesso; T9 – G/P+C+Ge: Calcário + Gesso + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco. Os valores são expressos como média $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas diferem-se segundo o teste Scoot Knoop (5%).

5.9 Fracionamento físico da matéria orgânica

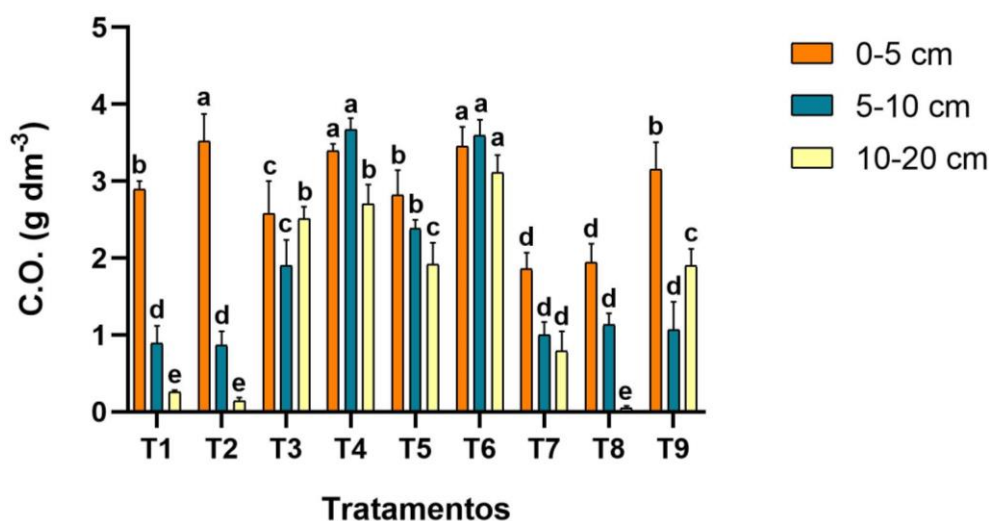
O fracionamento granulométrico da MOS consiste na separação de duas frações orgânicas: o carbono orgânico particulado (COp), fração da MOS separada por peneiramento do solo associada à fração areia (COp > 53 μ m) e o carbono orgânico associado aos minerais (COam), a fração da MOS associada às frações silte e argila do solo (COam < 53 μ m). Na fração de COp é encontrado MO como partículas derivadas de resíduos de plantas, possui maior permanência no solo, atua na proteção física e química do solo e é fundamental para o sequestro de C atmosférico. GOLCHIN *et al.*, 1994a). Na fração de COam, se encontra a MOS que interage com a superfície de partículas minerais, formando os complexos organominerais, possuem alta taxa de decomposição e baixa permanência no solo, fornece nutrientes às plantas através da mineralização, energia e C aos microrganismos do solo (Silva & Mendonça, 2007).

O C orgânico do solo (particulado) obtido através da MO da fração de argila do solo, em geral, apresentou maiores níveis na primeira camada, visto que nessa camada (0-5 cm) se concentra a maior parte da matéria orgânica do solo. Os tratamentos que obtiveram os maiores valores de C orgânico foram T2 com 3,52 g dm⁻³, solo de mata, e T4, com 3,39 g dm⁻³ e T6, com 3,46 g dm⁻³, tratamentos com mucuna-preta (Figura 25).

Tratamentos com mucuna-preta, T4 e T6 também se destacaram de forma significativa na segunda camada, com 3,67 e 3,59 g dm⁻³, e o T6 se destacou na terceira camada também, com 3,11 g dm⁻³ (Figura 25). Isso possivelmente acontece devido ao incremento de matéria orgânica no solo através do cultivo de mucuna-preta, o que aumenta o nível de C orgânico no solo (Dissanayaka *et al.*, 2024). Além disso, essa espécie possui sistema radicular pivotante, além de formar nódulos nas raízes em associação simbiótica com bactérias para FBN o que pode favorecer o aumento de matéria orgânica e C orgânico em camadas de até 20 cm de solo (; Lima Filho, 2023; Cherubin, 2024; Dissanayaka *et al.*, 2024).

Segundo Ansari *et al.* (2022) a incorporação de leguminosas como adubos verdes, melhorou consideravelmente o C orgânico do solo, além de outras propriedades de qualidade do solo, como disponibilidade de nutrientes (N, P e K) e agregações do solo.

Figura 25 – Carbono orgânico do solo
Carbono Orgânico do Solo



Fonte: elaborado pela autora.

Legenda: Teor de matéria orgânica no solo em profundidades diferentes (0-5, 5-10, 10-20 cm), em relação aos diferentes manejos para recuperação de solos degradados. T1 – SE: Solo exposto (Controle) - sem técnica de recuperação; T2 – MA: Vegetação nativa de Cerrado (Controle); T3 – SM: Solo mobilizado (vegetação espontânea); T4 – MP: Mucuna-preta (*Stizolobium aterrium* Piper & Tracy); T5 – G/P: Guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) até 1994, após substituído por Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC); T6 – MP+C: Mucuna-preta + Calcário; T7 – G/P+C: Calcário + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco; T8 – MP+C+Ge: Mucuna-preta + Calcário + Gesso; T9 – G/P+C+Ge: Calcário + Gesso + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco. Os valores são expressos como média $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas diferem-se segundo o teste Scoot Knoop (5%).

5.10 Teor de matéria orgânica no solo

A matéria orgânica do solo (MOS) é o indicador central da qualidade e saúde do solo, ela fornece agentes ligantes orgânicos, diminui a densidade do solo e melhora a elasticidade e resiliência de todo o solo, melhorando propriedades físicas do solo, logo, é importante que se utilize manejos que preservem ou aumentem a matéria orgânica do solo (Liu *et al.*, 2006; Blanco-Canqui; Benjamin, 2015). Para solos de textura média, o teor de matéria orgânica está entre 16 e 30 g/dm³ (Cantarella *et al.*, 2022).

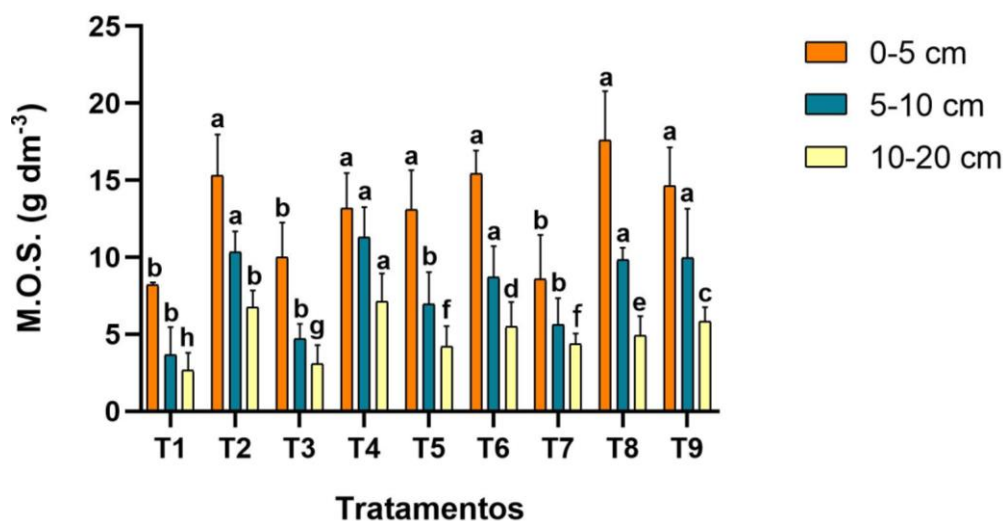
A matéria orgânica do solo (MOS) está em níveis abaixo do ideal em todos os tratamentos, porém com diferença entre eles. Como o solo está em processo de recuperação, ele possui algumas deficiências, com aspectos ainda a serem melhorados e no processo de evolução da qualidade do solo.

A MOS geralmente apresenta maiores teores na camada superficial do solo, de 0 a 5 cm, conforme demonstrado na Figura 26. À medida que a profundidade aumenta, esses teores tendem a diminuir. Para as profundidades avaliadas, T1 e T3 registraram valores menores, no primeiro caso, possivelmente devido à ausência de espécies vegetais, que desempenham um papel crucial na formação da M.O. no solo (Liu *et al.*, 2006; Blanco-Canqui; Benjamin, 2015). No segundo caso, a ausência de adubação verde (leguminosas), além da ausência de vegetação de forma geral por um período, de 1992 a 1997, possivelmente diminuíram a eficiência da recuperação de solo comparado aos demais tratamentos onde essa realidade foi diferente (Figura 26). Segundo Fonseca, Martins e Villa (2023), leguminosas promovem um rápido estabelecimento da cobertura vegetal e incremento da M.O. no solo, sendo uma alternativa viável na restauração ecológica. Esses resultados estão alinhados com o estudo de Souza *et al.* (2024), que evidencia que um manejo conservacionista de longo prazo promove o aumento do teor de matéria orgânica do solo.

Os tratamentos com mucuna (T4, T6 e T8) mostram uma tendência superior de acúmulo de matéria orgânica nas camadas de 5-10 cm e 10-20 cm, em comparação com os tratamentos que utilizaram feijão de porco e guandu. Vale ressaltar que o tratamento com mucuna também registrou um aumento de 7% na matéria orgânica do solo em comparação com o tratamento com adubação mineral na profundidade de 10-20cm, evidenciando o potencial da mucuna em incrementar a matéria orgânica em profundidades maiores do solo (Figura 26).

O cultivo de mucuna fornece uma fonte de carbono e energia para os microrganismos do solo, promovendo a biodiversidade do solo (Dissanayaka *et al.*, 2024). Essa biodiversidade, além de melhorar as propriedades físicas do solo, contribui como agente cimentante para a formação de agregados e a acumulação de matéria orgânica (Wawan; Dini; Hapsch, 2019).

Figura 26 – Teor de matéria orgânica do solo
Matéria Orgânica do Solo



Fonte: elaborado pela autora.

Legenda: Teor de matéria orgânica no solo em profundidades diferentes (0-5, 5-10, 10-20 cm), em relação aos diferentes manejos para recuperação de solos degradados. T1 – SE: Solo exposto (Controle) - sem técnica de recuperação; T2 – MA: Vegetação nativa de Cerrado (Controle); T3 – SM: Solo mobilizado (vegetação espontânea); T4 – MP: Mucuna-preta (*Stizolobium aterrium* Piper & Tracy); T5 – G/P: Guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) até 1994, após substituído por Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC); T6 – MP+C: Mucuna-preta + Calcário; T7 – G/P+C: Calcário + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco; T8 – MP+C+Ge: Mucuna-preta + Calcário + Gesso; T9 – G/P+C+Ge: Calcário + Gesso + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco. Os valores são expressos como média $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas diferem-se segundo o teste Scoot Koot (5%).

5.11 Estoque de carbono no solo

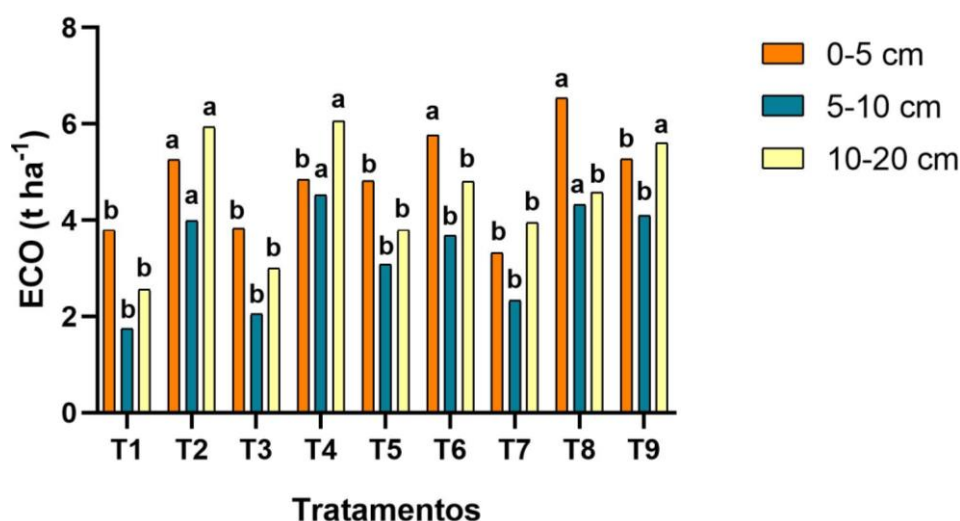
Os tratamentos que apresentaram maior estoque de carbono no solo foram o solo de mata (T2) e os tratamentos com mucuna-preta (T4, T6 e T8), mais uma vez é reforçado o benefício da mucuna para o incremento da MO, além disso, os tratamentos os tratamentos com guandu (T5 e T9) obtiveram resultados pouco abaixo da mucuna, porém ainda melhores de o solo exposto (Figura 27). Com esse resultado, é nítida a diferença entre tratamentos com aplicação de adubação verde desde o início da implantação, para o solo exposto ou mesmo o solo mobilizado, o qual recebeu a gramínea *Urochloa decumbens* porém sem adição anterior de leguminosas, mostrando a importância das leguminosas e do tempo de manejo no nível de carbono estocado do solo.

A presença de vegetação aumenta o fornecimento de matéria orgânica para o solo com a ciclagem de nutrientes, consequentemente incrementando o estoque de C

do solo (Zhao *et al.*, 2024; Zheng *et al.*, 2024). De acordo com Lima *et al.* (2018), o feijão-guandu incrementou teores de estoque C orgânico no solo comparado a solo de pousio na camada de 10-20 cm. O uso de alguns adubos verdes como como sesbania, feijão-caupi e grama-verde por cinco anos aumentaram significativamente os estoques de carbono orgânico total em comparação com solos sem adubação verde (Ansari *et al.*, 2022).

A biomassa de adubação verde, principalmente leguminosas, aumenta o acúmulo de C orgânico no solo e possui relevância para o sequestro de C nos solos de regiões tropicais e subtropicais (Nandan *et al.*, 2019). Segundo Conceição *et al.* (2014), o manejo conservacionista do solo, com alto aporte de biomassa incrementou matéria orgânica no solo e aumentou o estoque de carbono do solo comparado ao manejo convencional de solo.

Figura 27 – Estoque de carbono orgânico do solo
Estoque de carbono orgânico



Fonte: elaborado pela autora.

Legenda: Estoque de carbono orgânico do solo, em profundidades diferentes (0-5, 5-10, 10-20 cm), em relação aos diferentes manejos para recuperação de solos degradados. T1 – SE: Solo exposto (Controle) - sem técnica de recuperação; T2 – MA: Vegetação nativa de Cerrado (Controle); T3 – SM: Solo mobilizado (vegetação espontânea); T4 – MP: Mucuna-preta (*Stizolobium aterrium* Piper & Tracy); T5 - G/P: Guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) até 1994, após substituído por Feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* (L.) DC); T6 – MP+C: Mucuna-preta + Calcário; T7 – G/P+C: Calcário + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco; T8 – MP+C+Ge: Mucuna-preta + Calcário + Gesso; T9 – G/P+C+Ge: Calcário + Gesso + Guandu até 1994, após substituído por Feijão-de-porco. Os valores são expressos como média ± desvio padrão. Letras minúsculas distintas diferem-se segundo o teste Scoot Knoop (5%).

6 CONCLUSÃO

Os tratamentos com mucuna e mucuna com calcário obtiveram os melhores resultados de acordo com as análises realizadas. As estratégias de uso da mucuna tiveram um impacto positivo na qualidade do solo em áreas degradadas. A presença dessa planta resultou em aumento da umidade, redução da resistência à penetração e da densidade do solo, além de melhorar a estabilidade dos agregados. Além disso, a presença de calcário em conjunto com a mucuna preta melhorou alguns aspectos químicos com pH, Ca, SB, V%, CO, e MOS e ECO. Esses resultados destacam a importância da mucuna no manejo de recuperação do solo ao longo de 30 anos, especialmente em profundidades de 5-10 e 10-20 cm.

O manejo de restauração com feijão guandu/feijão-de-porco, combinado com gessagem e calagem, demonstrou melhora em atributos como umidade gravimétrica, infiltração, densidade do solo, pH, Ca, Mg, K, SB, V% e MOS sugerindo ser uma opção promissora para a melhoria da estrutura do solo em comparação com outras estratégias contendo esses condicionadores do solo.

REFERÊNCIAS

- ABDU, A.; LAEKEMARIAM, F.; GIDAGO, G.; GETANEH, L. Explicando a qualidade do solo usando diferentes técnicas de avaliação. **Applied and Environmental Soil Science**, London, v. 2023, p. 1–15, 24 mar. 2023.
- AKER, A.; PASSOS, A. Performance de plantas leguminosas para sistema plantio direto na região amazônica. **Enciclopédia Biosfera**, St. Petersburg, v. 15, n. 28, p. 804–814, 3 dez. 2018.
- ALSULAMI, A.; PETROVSKII, S. Um modelo de extinção em massa que leva em conta a resposta evolutiva diferencial das espécies a uma mudança climática. **Chaos, Solitons & Fractals**, Oxford, v. 175, p. 114018, out. 2023.
- ALVES, M. C. **Recuperação do subsolo de um Latossolo Vermelho usado para terrapleno e fundação da usina hidrelétrica de Ilha Solteira - SP**. 2001. Tese (Livre Docência em Solos) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2001.
- ALVES, M. C.; NASCIMENTO, V. DO; SOUZA, Z. M. DE. Recuperação em área de empréstimo usada para construção de usina hidrelétrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 8, p. 887–893, ago. 2012.
- ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M. DE. Recuperação de área degradada por construção de hidroelétrica com adubação verde e corretivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 2505–2516, dez. 2008.
- AMÉZKETA, E. Estabilidade de agregados no solo: uma revisão. **Journal of Sustainable Agriculture**, New York, v. 14, n. 2–3, p. 83–151, 16 jul. 1999.
- ANDRADE JÚNIOR, R. T. **Propriedades Físico-químicas de um solo em Recuperação e adaptação da Brachiaria decumbens**. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.
- ANGERS, D. A.; BULLOCK, M. S.; MEHUYS, G. R. Estabilidade de agregados em água. In: CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G. (ed.). **Amostragem de solo e métodos de análise**. 2. ed. Boca Raton, FL: Canadian Society of Soil Science; CRC Press, 2008. p. 811–819.
- ANIKWE, M. A. N.; EZE, J. C.; IBUDIALO, A. N. Influência da aplicação de cal e gesso nas propriedades do solo e na produção de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz.) em um Argissolo degradado em Agbani, Enugu, sudeste da Nigéria. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 158, p. 32–38, maio 2016.

ANSARI, M. A.; CHOUDHURY, B. U.; LAYEK, J.; DAS, A.; LAL, R.; MISHRA, V. K. Adubação verde e manejo de resíduos de culturas: efeito no estoque de carbono orgânico do solo, agregação e produtividade do sistema no sopé do Himalaia Oriental (Índia). **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 218, p. 105318, 1 abr. 2022.

BASCHE, A. D.; DELONGE, M. S. Comparação das taxas de infiltração em solos manejados com métodos agrícolas convencionais e alternativos: uma meta-análise. **Plos One**, San Francisco, v. 14, n. 9, p. e0215702, 19 set. 2019.

BELETE, T.; YADETE, E. Efeito da monocultura na saúde do solo e no manejo da fertilidade para práticas agrícolas sustentáveis: uma revisão. **Journal of Plant Sciences**, Chicago, 30 nov. 2023.

BLANCO-CANQUI, H.; BENJAMIN, J. G. Impactos do carbono orgânico do solo no comportamento físico do solo. *In*: LOGSDON, S.; BERLI, M.; HORN, R. (ed.). **Advances in agricultural systems modeling**. Madison: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 2015. p. 11–40.

BOLFE, É. L.; VICTORIA, D. D. C.; SANO, E. E.; BAYMA, G.; MASSRUHÁ, S. M. F. S.; DE OLIVEIRA, A. F. Potencial de expansão agrícola em áreas de pastagens degradadas no Brasil com base em bancos de dados geoespaciais. **Land**, Basel, v. 13, n. 2, p. 200, 6 fev. 2024.

BONINI, C. DOS S. B.; ALVES, M. C. Recuperação das propriedades físicas do solo por meio de adubos verdes, calagem, gesso, pastagem e espécies de ocorrência espontânea. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, p. 1397–1406, ago. 2011.

BONINI, C. S. B. **Restauração ecológica de um solo decapitado sob intervenção antrópica há 17 anos**. 2012. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C. Qualidade física de um Latossolo Vermelho em recuperação há dezessete anos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 4, p. 329–336, abr. 2012.

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C.; MONTANARI, R. Recuperação da estrutura de um Latossolo vermelho degradado utilizando lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 10, n. 1, p. 34–42, 27 mar. 2015.

BRANDÃO, V. D. S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. DA. **Infiltração da água no solo**. [S. l.]: UFV, 2006.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Energia de hidrelétricas é considerada uma das mais seguras e limpas**. [S. l.], 2023. Notícia. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202310/energia-de-hidreletricas-e-considerada-uma-das-mais-seguras-e-limpas>. Acesso em: 24 nov. 2024.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Mudanças na matéria orgânica do solo particulado em uma sequência de cultivo de pastagens. **Soil Science Society of America Journal**, Hoboken, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992.

CAMPANHARO, Í. F.; MARTINS, S. V.; VILLA, P. M.; KRUSCHEWSKY, G. C.; DIAS, A. A.; NABETA, F. Métodos de restauração florestal, sazonalidade e resistência à penetração não influenciam estoque de biomassa acima do solo em rejeitos de mineração em Mariana, Brasil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 93, n. 1, p. e20201209, 2021.

CAMPOS, F. D. S. D.; ALVES, M. C. Uso de lodo de esgoto na reestruturação de solo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1389–1397, ago. 2008.

CANARACHE, A. PENETR - um modelo semi-empírico generalizado que estima a resistência do solo à penetração. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n. 1–2, p. 51–70, abr. 1990.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; MATTOS JR, D.; BOARETTO, R. M.; RAIJ, B. V. **Boletim 100**: recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônômico (IAC), 2022.

CARNEIRO, R. G.; MENDES, I. DE C.; LOVATO, P. E.; CARVALHO, A. M. DE; VIVALDI, L. J. Indicadores biológicos associados ao ciclo do fósforo em solos de Cerrado sob plantio direto e plantio convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, p. 661–669, jul. 2004.

CARVALHO, J. C. B. D. C.; ESPINDOLA, C. R. E.; ALVES, M. C.; GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Análise espacial de atributos físicos do solo de uma área degradada sob diferentes tipos de manejo. **African Journal of Environmental Science and Technology**, Sapele, v. 11, n. 9, p. 486–498, 30 set. 2017.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R. D.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 2, p. 277–290, abr. 2010.

CASTRO FILHO, C.; LOGAN, T. J. Efeitos da calagem na estabilidade e erodibilidade de alguns latossolos brasileiros. **Soil Science Society of America Journal**, Hoboken, v. 55, n. 5, p. 1407–1413, set. 1991.

CASTRO FILHO, C.; LOURENÇO, A.; DE F. GUIMARÃES, M.; FONSECA, I. C. B. Estabilidade de agregados sob diferentes sistemas de manejo de solo em um latossolo vermelho no estado do Paraná, Brasil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 1, p. 45–51, abr. 2002.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 3, p. 527–538, set. 1998.

CASTRO, P. R. DE C. E.; CARVALHO, M. E. A.; SILVA, M. S. D.; FAVA, R. D.; NICOLAI, A. B.; SALIB, N. C. (ed.). **Braquiárias: ecofisiologia**. [S. l.]: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2023.

CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; CERRI, C. E. P.; LAL, R. Desafios e oportunidades do sequestro de carbono do solo na América Latina. *In: Carbon sequestration in soils of Latin America*. New York: Haworth Press, 2006, p. 554.

CHAPPELL, A.; WEBB, N. P.; LEYS, J. F.; WATERS, C. M.; ORGILL, S.; EYRES, M. J. Minimizar a erosão do carbono orgânico do solo pelo vento é fundamental para a neutralidade da degradação do solo. **Environmental Science & Policy**, New York, v. 93, p. 43–52, mar. 2019.

CHERUBIN, M. R. (ED.). **Guia prático de plantas de cobertura: espécies, manejo e impacto na saúde do solo**. [S. l.]: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2024.

CHITERO, J. G. M.; BONINI NETO, A.; BONINI, C. D. S. B.; HEINRICHS, R.; SOARES FILHO, C. V.; MATEUS, G. P.; BISI, B. S.; COSTA, N. R.; PIAZENTIN, J. C.; MEIRELLES, G. C.; GABRIEL FILHO, L. R. A. Análise da recuperação física de solos degradados via Redes Neurais Artificiais por meio de uma interface gráfica. **Research, Society and Development**, Itabira, v. 9, n. 7, p. e257973719, 12 maio 2020.

CINTRA, F. L. D.; MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 7, p. 197–201, 1983.

CONCEIÇÃO, P. C.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; SANTOS, D. C. Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, p. 794–800, maio 2014.

CROTWELL, A.; GERBIG, C.; JORDAN, A.; LAN, X. O estado dos gases de efeito estufa na atmosfera com base em observações globais até 2023. **WMO Greenhouse Gas Bulletin**, [s. l.], n. 20, p. 1–11, out. 2024.

DAVIS, W. J. Extinções em massa e sua relação com a concentração de dióxido de carbono na atmosfera: implicações para o futuro da Terra. **Earth's Future**, Oxford, v. 11, n. 6, p. e2022EF003336, jun. 2023.

DIECKOW, J.; BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. **Sistemas conservacionistas de preparo do solo e implicações no ciclo do carbono**. São Carlos: Embrapa, 2004. v. 12. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/30484/1/DOC122004.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2024.

DISSANAYAKA, D. M. N. S.; UDUMANN, S. S.; NUWARAPAKSHA, T. D.; ATAPATTU, A. J. Aproveitando o potencial da cobertura vegetal de mucuna: uma revisão abrangente de seus benefícios agrônômicos e ambientais. **Circular Agricultural Systems**, Fayetteville, v. 4, n. 1, p. 0–0, 2024.

DIXON, R. K.; SOLOMON, A. M.; BROWN, S.; HOUGHTON, R. A.; TREXIER, M. C.; WISNIEWSKI, J. Reservatórios de carbono e fluxo de ecossistemas florestais globais. **Science**, Washington, v. 263, n. 5144, p. 185–190, 14 jan. 1994.

DOBRIYAL, P.; QURESHI, A.; BADOLA, R.; HUSSAIN, S. A. Uma revisão dos métodos disponíveis para estimar a umidade do solo e suas implicações para o gerenciamento dos recursos hídricos. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 458–459, p. 110–117, ago. 2012.

DUTARTRE, PH.; BARTOLI, F.; ANDREUX, F.; PORTAL, J. M.; ANGE, A. Influência do conteúdo e da natureza da matéria orgânica na estrutura de alguns solos arenosos da África Ocidental. **Geoderma**, Amsterdam, v. 56, n. 1–4, p. 459–478, mar. 1993.

ESWARAN, H.; BERG, E. V. D.; REICH, P. Carbono orgânico em solos do mundo. **Soil Science Society of America Journal**, Hoboken, v. 57, n. 1, p. 192–194, jan. 1993.

FALKER. **Medidor digital de compactação do solo**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.falker.com.br/br/penetrolog>. Acesso em: 26 nov. 2024.

FARIA, C. M. B. DE; COSTA, N. D.; FARIA, A. F. Atributos químicos de um argissolo e rendimento de melão mediante o uso de adubos verdes, calagem e adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 299–307, abr. 2007.

FERREIRA, D. F. Sisvar: um sistema computacional de análise estatística. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, dez. 2011.

FONSECA, W. D. S.; MARTINS, S. V.; VILLA, P. M. Adubação verde como alternativa para recuperação de solos em ambiente de mineração de bauxita no sudeste do Brasil. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 1, p. e20220041, 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Status of the world's soil resources**: main report. Roma: FAO, 2015.

FRANCOS, N.; CHABRILLAT, S.; TZIOLAS, N.; MILEWSKI, R.; BRELL, M.; SAMARINAS, N.; ANGELOPOULOU, T.; TSAKIRIDIS, N.; LIAKOPOULOS, V.; RUHTZ, T.; BEN-DOR, E. Estimativa da taxa de infiltração de água em solos arenosos do Mediterrâneo usando sensores hiperespectrais aerotransportados. **CATENA**, Amsterdam, v. 233, p. 107476, dez. 2023.

FREIDENREICH, A.; DATTAMUDI, S.; LI, Y.; JAYACHANDRAN, K. Influência de leguminosas de cobertura nas propriedades químicas e biológicas do solo em um

pomar de frutas tropicais de plantio direto. **Land**, Basel, v. 11, n. 6, p. 932, 17 jun. 2022.

GABRIEL, J. L.; GARCÍA-GONZÁLEZ, I.; QUEMADA, M.; MARTIN-LAMMERDING, D.; ALONSO-AYUSO, M.; HONTORIA, C. As culturas de cobertura reduzem a resistência do solo à penetração, preservando o conteúdo de água da superfície do solo. **Geoderma**, Amsterdam, v. 386, p. 114911, mar. 2021.

GIJSMAN, A. Estabilidade de agregados do solo e frações da matéria orgânica do solo em sistemas agropastoris estabelecidos em cerrado nativo. **Australian Journal Soil Research**, Clayton, v. 34, n. 6, p. 891, 1996.

HAN, S.; DELGADO-BAQUERIZO, M.; LUO, X.; LIU, Y.; VAN NOSTRAND, J. D.; CHEN, W.; ZHOU, J.; HUANG, Q. Relações dependentes do tamanho dos agregados do solo entre a diversidade funcional microbiana e a multifuncionalidade. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 154, p. 108143, mar. 2021.

HARUNA, S. I.; ANDERSON, S. H.; UDAWATTA, R. P.; GANTZER, C. J.; PHILLIPS, N. C.; CUI, S.; GAO, Y. Melhoria das propriedades físicas do solo através do uso de culturas de cobertura: uma revisão. **Agrosystems, Geosciences & Environment**, Hoboken, v. 3, n. 1, p. e20105, jan. 2020.

HE, T.; DING, W.; CHENG, X.; CAI, Y.; ZHANG, Y.; XIA, H.; WANG, X.; ZHANG, J.; ZHANG, K.; ZHANG, Q. Meta-análise mostra os impactos da restauração ecológica nas emissões de gases de efeito estufa. **Nature Communications**, London, v. 15, n. 1, p. 2668, 26 mar. 2024.

HORTON, B.; KHAN, N.; CAHILL, N.; LEE, J.; SHAW, T.; GARNER, A.; KEMP, A.; ENGELHART, S.; RAHMSTORF, S. **Estimativa da elevação média global do nível do mar e suas incertezas até 2100 e 2300 a partir de uma pesquisa de especialistas**. [S. l.]: Assembleia Geral da EGU, 2020. p. 7302.

HUNTER, D. J.; YAPA, L. G. G.; HUE, N. V.; EAQUB, M. Efeitos do adubo verde e da cal coralina no crescimento do milho e nas propriedades químicas de um latossolo ácido na Samoa Ocidental. **Biologia e fertilidade dos solos**, [s. l.], v. 24, n. 3–4, p. 266–273, 1997.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Mudanças climáticas 2021 – A base da ciência física**: Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. 1. ed. [S. l.]: Cambridge University Press, 2021.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Estabilidade de agregados e distribuição de tamanho. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (ed.). **Métodos de Análise de Solos**: métodos físicos e mineralógicos. Madison: Soil Science Society of America, 1986. p. 425–442.

KHATSURIYA, P. A.; MAKWANA, V. M.; DODIA, P. P. Resiliência da biodiversidade em meio às mudanças climáticas: uma perspectiva global. In: IDRIS, S. (ed.).

Advances in environmental engineering and green technologies. [S.l.]: IGI Global, 2024. p. 75–99.

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; BERTON, A. L. **Compactação e descompactação de solos.** Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. (Documentos, 19).
KUMAR, V. Aquecimento global e mudança climática. **Journal of Research in Social Science and Humanities**, Gurugram, v. 3, n. 3, p. 16–23, mar. 2024.

LAL, R. Sequestro de carbono do solo para mitigar as mudanças climáticas. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, n. 1–2, p. 1–22, nov. 2004.

LAL, R.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J.; CERRI, C. E. P. Sequestro de carbono em solos da América Latina. **Land Degradation & Development**, Oxford, v. 18, n. 5, p. 589–590, set. 2007.

LAL, R.; KIMBLE, J.; FOLLETT, R. F. Processos pedosféricos e o ciclo do carbono. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLETT, R. F.; STEWART, B. A. (ed.). **Methods for assessment of soil degradation.** Boca Raton: CRC Press, 1997. p. 1–8.

LAMA, C. D. *et al.* RAD 2023 - Relatório anual do desmatamento no Brasil. [S. l.]: MapBiomass Alerta, 2024.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia.** 2. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2021.

LIMA FILHO, O. F. DE. **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil:** Fundamentos e prática. Brasília, DF: Embrapa, 2023.

LIMA, I. M. DE O.; SILVA, M. F. G.; ENSINAS, S. C.; SILVA, J. R. M. DA; FILHO, W. C. M.; BARBOSA, G. F. Adubos verdes para o incremento dos estoques de carbono em Neossolo Quartzarênico de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 13, n. 4, p. 1–7, 31 dez. 2018.

LIU, X.; HERBERT, S. J.; HASHEMI, A. M.; ZHANG, X.; DING, G. Efeitos do manejo agrícola na matéria orgânica do solo e na transformação do carbono - uma revisão. **Plant, Soil and Environment**, Prague, v. 52, n. 12, p. 531–543, 31 dez. 2006.

LIU, Z.; LI, J.; BAYAERTA; NIU, K. Biodiversidade em comunidades de mosaico: a diversidade microbiana do solo está associada a grupos funcionais de plantas relacionados ao fósforo disponível no solo em prados alpinos tibetanos. **European Journal of Soil Biology**, Issy les Moulineaux, v. 116, p. 103479, 1 maio 2023.

LOURENCETTI, J. **Restauração ecológica de um latossolo vermelho decapitado sob intervenção antrópica há 30 anos.** 2023. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2023.

MAGALHÃES, J. C. A. J. de; VIEIRA, R. F.; PEREIRA, J.; PERES, J. R. R. Efeito da adubação verde na disponibilidade de fósforo de fosfatos, numa sucessão de culturas, em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, n. 3, p. 329–337, set./dez. 1991.

MAPBIOMAS. **Monitor do fogo**. [S. l.]: MapBiombras Brasil, out. 2024. (Boletim, v. 10). Disponível em: https://brasil.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/4/2024/11/10_Boletim_fogo_Outubro2024.pdf. Acesso em: 26 nov. 2024.

MARCHINI, D. C.; LING, T. C.; ALVES, M. C.; CRESTANA, S.; SOUTO FILHO, S. N.; ARRUDA, O. G. D. Matéria orgânica, infiltração e imagens tomográficas de Latossolo em recuperação sob diferentes tipos de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 6, p. 574–580, jun. 2015.

MARSCHNER, H. **Nutrição mineral de plantas superiores**. 2nd. ed. London San Diego: Academic Press, 1995.

MIGUEL, P. *et al.* Restauração física de um solo de mina após 10,6 anos de revegetação. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 227, p. 105599, mar. 2023.

MORAES, M. T. D.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. D. Limites críticos de resistência à penetração em um Latossolo vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 1, p. 288–298, fev. 2014.

NAGUMO, F.; ISSAKA, R. N.; HOSHIKAWA, A. Efeitos de práticas de cultivo combinadas com pousio de mucuna na erosão do solo e na dinâmica da água na Ilha de Ishigaki, Japão. **Soil Science and Plant Nutrition**, Singapore, v. 52, n. 6, p. 676–685, dez. 2006.

NANDAN, R.; SINGH, V.; SINGH, S. S.; KUMAR, V.; HAZRA, K. K.; NATH, C. P.; POONIA, S. P.; MALIK, R. K.; BHATTACHARYYA, R.; MCDONALD, A. Impacto da lavoura conservacionista em sistemas de cultivo baseados em arroz na agregação do solo, reservas de carbono e nutrientes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 340, p. 104–114, 2019.

NEIRO, E. S.; MATA, J. D. V.; TORMENA, C. A.; GONÇALVES, A. C. A.; PINTRO, J. C.; COSTA, J. M. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho distroférico, com rotação e sucessão de culturas, sob plantio direto. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 25, p. 19–25, 2003.

NIJS, E. A. DE; CAMMERAAAT, E. L. H. A estabilidade e o destino do carbono orgânico do solo durante a fase de transporte da erosão do solo. **Earth-Science Reviews**, Amsterdam, v. 201, p. 103067, fev. 2020.

PENDRILL, F. *et al.* Desvendando os números por trás do desmatamento tropical causado pela agricultura. **Science**, Washington, v. 377, n. 6611, p. eabm9267, 9 set. 2022.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. **Estatística Aplicada a Experimentos**. [S. l.]: FEALQ, 2002.

QIAN, J.; JI, C.; YANG, J.; ZHAO, H.; WANG, Y.; FU, L.; LIU, Q. A vantagem do reflorestamento com espécies arbóreas nativas para melhorar a qualidade do solo em ecossistemas florestais degradados. **Scientific Reports**, London, v. 14, n. 1, p. 20022, 28 ago. 2024.

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Adubação orgânica. In: RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo: Fundação IAC, 1997. p. 30-35. (Boletim técnico, 100).

RAIJ, B. VAN; ANDRADE, J. C. DE; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo (IAC), 2001.

RASOOL, R.; THAKUR, S. Mobilidade e degradação de pesticidas no solo – risco de contaminação de águas subterrâneas. **Indian Journal of Entomology**, New Delhi, p. 1–13, 28 out. 2022.

RAYHAN, A.; KINZLER, R.; RAYHAN, R. **Mudanças climáticas e aquecimento global**: estudando impactos, causas, mitigação e adaptação. [S. l.: s. n.], 2023.

RAZA, A.; RAZZAQ, A.; MEHMOOD, S. S.; ZOU, X.; ZHANG, X.; LV, Y.; XU, J. Impacto das mudanças climáticas na adaptação das culturas e estratégias para lidar com seus resultados: uma revisão. **Plants**, Basel, v. 8, n. 2, p. 34, fev. 2019.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, [s. l.], v. 27, p. 29–48, 2023.

RIPPLE, W. J.; WOLF, C.; GREGG, J. W.; ROCKSTROM, J.; MANN, M. E.; ORESKES, N.; LENTON, T. M.; RAHSTORF, S.; NEWSOME, T. M.; XU, C.; SVENNING, J. C.; PEREIRA, C. C.; LAW, B. E.; CROWTHER, T. W. The 2024 state of the climate report: Perilous times on planet Earth. **BioScience**, Oxford, v. 74, n. 12, p. biae087, 8 out. 2024.

ROSENBERG, N. J. Resposta das plantas aos efeitos físicos da compactação do solo. In: SPARKS, D. L. **Advances in Agronomy**. Newark: Elsevier, 1964. v. 16. p. 181–196.

ROTH, C. H.; PAVAN, M. A.; CHAVES, J. C. D.; MEYER, B.; FREDE, H. G. Efeito das aplicações de calcário e gesso sobre a estabilidade de agregados e infiltração de água em um Latossolo Roxo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 10, p. 163–166, 1986.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. D. G. **Compactação do solo**: consequências para o crescimento vegetal. Brasília, DF: Embrapa, 2005. p. 3–26. (Documentos 136).

SANTOJANNI, F. B.; MINER, H.; HAIN, H.; SUTTON, G. O Impacto das Mudanças Climáticas na Biodiversidade dos Ecossistemas Costeiros. **Jurnal Ilmu Pendidikan dan Humaniora**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 167–182, 30 set. 2023.

SANTOS, H. G.; JOCOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBREARAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SEPEHYA, S.; MEHTA, D.; KUMAR, A.; SHARMA, R.; SHARMA, D.; SHARMA, A. Conceito e metodologia de avaliação da qualidade do solo: uma revisão. **International Journal of Plant & Soil Science**, Kota Semarang, v. 36, n. 5, p. 164–172, 21 mar. 2024.

SILVA, A. D. N.; FIGUEIREDO, Cícero Célio de; CARVALHO, A. M. D.; SOARES, D. D. S.; SANTOS, D. C. R. D.; SILVA, V. G. D. Efeitos de culturas de cobertura na proteção física da matéria orgânica e na agregação do solo. **Australian Journal of Crop Science**, Lismore, v. 10, n. 12, p. 1623–1629, 20 dez. 2016.

SOARES, M. B.; TAVANTI, R. F. R.; RIGOTTI, A. R.; LIMA, J. P. D.; FREDDI, O. D. S.; PETTER, F. A. Uso de plantas de cobertura na Amazônia Meridional: Qual o impacto na qualidade física do solo? **Geoderma**, Amsterdam, v. 384, p. 114796, fev. 2021.

SOUTO, S. N.; ALVES, M. C.; MONREAL, C. M.; BONINI, C. DOS S. B. Nanopartículas e morfologia da nanoestrutura de um Latossolo Vermelho em recuperação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, p. 530–536, ago. 2017.

SOUZA, R. S. D.; MORAIS, I. S. D.; ROSSET, J. S.; RODRIGUES, T. D. M.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G. Agregação como indicador de qualidade do solo em áreas sob diferentes usos e manejos. **Farming System**, Amsterdam, v. 2, n. 2, p. 100082, abr. 2024.

TARASOVA, O.; VERMEULEN, A.; SAWA, Y.; HOUWELING, S.; DLUGOKENCKY, E. **O estado dos gases de efeito estufa na atmosfera usando observações globais até 2019**. [S. l.], 3 mar. 2021. Disponível em: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU21/EGU21-4409.html>. Acesso em: 25 nov. 2024.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

THAKUR, J. K.; MANDAL, A.; MANNA, M. C.; JAYARAMAN, S.; PATRA, A. K. Impacto da queima de resíduos nas propriedades biológicas do solo. In: JAYARAMAN, S.; DALAL, R. C.; PATRA, A. K.; CHAUDHARI, S. K. (ed.). **Agricultura de conservação: uma abordagem sustentável para a saúde do solo e segurança alimentar**. Singapore: Springer Singapore, 2021. p. 379–389.

TSAI, D. *et al.* **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil.** [S. l.]: Sistema de Estimativa de Emissão de Gases - SEEG, 2023. p. 1–34.

ÜÇLER, G.; ÖZŞAHİN, Ş. A dimensão humana das alterações climáticas globais: migração climática e refugiados climáticos. *In: Reference Module in Social Sciences.* [S. l.]: Elsevier, 2024. p. B9780443137761002452.

UDDIN, M. F.; CHAUDHRY, D. A. G.; SHABIR, S. Avaliação do impacto das alterações climáticas na biodiversidade global: tendências e previsões. **International Journal of Trends and Innovations in Business & Social Sciences**, Islamabad, v. 2, n. 2, p. 209–219, 30 jun. 2024.

VAVRUS, S. J.; PUZ, A.; KRUSE, S.; PATZ, J. A. Aplicando a ciência do clima às mudanças climáticas e eventos climáticos extremos. *In: LEVY, B. S.; PATZ, J. A. (ed.). Climate change and public health.* 2. ed. Oxford: Oxford University Press, New York, 2024. p. 30–48.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. Um exame do método Degtjareff para determinar a matéria orgânica do solo e uma modificação proposta do método de titulação de ácido crômico. **Soil Science**, Philadelphia, v. 37, p. 29-38. 1934.

WAWAN; DINI, I. R.; HAPSOH. Efeito da cultura de cobertura de leguminosas *Mucuna bracteata* nas propriedades físicas do solo, escoamento superficial e erosão em três encostas de plantação imatura de dendezeiros. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Bristol, v. 250, p. 012021, 5 abr. 2019.

WORLD RESOURCES INSTITUTE – WRI. **Emissões mundiais de gases de efeito estufa:** 2020. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.wri.org/data/world-greenhouse-gas-emissions-2020>. Acesso em: 23 nov. 2024.

YADAV, M.; SINGH, NITIN KUMAR; SINGH, NEERAJ KUMAR; JAGWANI, T.; YADAV, S. Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas e fertilizantes. *In: KUMAR, M.; MOHAPATRA, S.; ACHARYA, K. (ed.). Contaminants of emerging concerns and reigning removal technologies.* London: CRC Press, 2022. p. 349–376.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. Um método rápido e preciso para determinação de rotina de carbono orgânico no solo. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 19, p. 1467–1476, 1 out. 1988.

ZHANG, R. Determinação da sorvidade do solo e condutividade hidráulica do infiltrômetro de disco. **Soil Science Society of America Journal**, Hoboken, v. 61, n. 4, p. 1024–1030, 1997.

ZHAO, W.; ZHAO, J.; LIU, M.; GAO, Y.; LI, W.; DUAN, H. Restauração da vegetação aumenta o armazenamento de carbono no solo em terras perturbadas por uma usina fotovoltaica em regiões semiáridas do norte da China. **Agronomy**, Basel, v. 14, n. 1, p. 9, jan. 2024.

ZHENG, J.; ZHANG, H.; ZHANG, S. Comparação das concentrações atmosféricas de dióxido de carbono com base em observações GOSAT, OCO-2 e dados TCCON baseados em terra. **Remote Sensing**, Basel, v. 15, n. 21, p. 5172, jan. 2023.

ZHENG, W.; GUO, X.; ZHOU, P.; TANG, L.; LAI, J.; DAI, Y.; YAN, W.; WU, J. Restauração da vegetação que melhora o sequestro de carbono do solo em ecossistemas de desertificação rochosa cárstica: uma meta-análise. **Journal of Environmental Management**, London, v. 370, p. 122530, 1 nov. 2024.

ZUAZO, V. H. D.; PLEGUEZUELO, C. R. R. Prevenção da erosão do solo e do escoamento por meio de cobertura vegetal. *In*: LICHTFOUSE, E.; NAVARRETE, M.; DEBAEKE, P.; VÉRONIQUE, S.; ALBEROLA, C. (ed.). **Sustainable Agriculture**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. p. 785–811.