



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCAR**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE - PPGAA**

**MATEUS LANZOTTI LANDGRAF**

**DINÂMICA ESPACIAL DO CARBONO E ATRIBUTOS DO SOLO EM SISTEMAS  
DE USO DA TERRA NO CERRADO**

**ARARAS – SP**

**Agosto de 2025**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS – UFSCAR  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE - PPGAA

**DINÂMICA ESPACIAL DO CARBONO E ATRIBUTOS DO SOLO EM SISTEMAS  
DE USO DA TERRA NO CERRADO**

Dissertação apresentada como exigência para  
obtenção do Título de Mestre em Agricultura e  
Ambiente no Programa de Pós-Graduação em  
Agricultura e Ambiente da Universidade  
Federal de São Carlos.

Orientador: Eduardo Barretto de Figueiredo

**ARARAS – SP**

**Agosto de 2025**

Landgraf, Mateus Lanzotti

Dinâmica espacial do carbono e atributos do solo em sistemas de uso da terra no cerrado / Mateus Lanzotti Landgraf -- 2025.  
82f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Araras, Araras  
Orientador (a): Eduardo Barretto de Figueiredo  
Banca Examinadora: Anna Hoffmann Oliveira, Ricardo de Oliveira Bordonal  
Bibliografia

1. Carbono no solo. 2. Sistemas de manejo. 3. Parâmetros físico-químicos do solo. I. Landgraf, Mateus Lanzotti. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática  
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Helena Sachi do Amaral - CRB/8  
7083



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

Centro de Ciências Agrárias  
Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente

---

**Folha de Aprovação**

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Mateus Lanzotti Landgraf, realizada em 27/08/2025.

**Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Eduardo Barretto de Figueiredo (UFSCar)

Profa. Dra. Anna Hoffmann Oliveira (UFSCar)

Prof. Dr. Ricardo de Oliveira Bordonal (CNPq)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao programa de pós-graduação em agricultura e ambiente (PPGAA), em especial ao corpo docente da pós-graduação, à secretaria e a todas as pessoas que se dedicaram a me ensinar, ouvir e a me auxiliar durante esta trajetória.

Agradeço o meu orientador Prof. Dr. Eduardo Barretto de Figueiredo pelo apoio, a paciência, dedicação e a orientação durante toda a minha jornada. A sua orientação foi de extrema importância para o desenvolvimento deste projeto.

Expresso minha sincera gratidão à minha banca examinadora pelo tempo, dedicação, disponibilidade e empenho por contribuir significativamente para o aprimoramento do meu projeto. Por todo o conhecimento e experiência que se dispuseram a compartilhar.

Agradeço em especial aos meus pais por sempre me orientarem, me apoiarem em cada etapa da minha vida. Agradeço aos meus avós pela sua sabedoria, ternura e carinho. Aos meus tios e tia por sempre me motivarem e me instigarem a ir além.

Agradeço os meus amigos que sempre estiveram comigo ao meu lado, que fizeram com que a minha jornada se tornasse mais leve e tranquila.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

A empresa Agrorobótica, na qual trabalho, que cedeu os dados para esse projeto, agradeço em especial ao CEO Fábio Angelis e a CTO Aida Magalhães.

## RESUMO

O estoque de carbono no solo é um indicador crucial da saúde do solo e um importante componente na mitigação das mudanças climáticas, sendo diretamente influenciado pelas práticas de uso e manejo da terra. A agropecuária de baixa emissão de carbono busca conciliar a produção de alimentos com a sustentabilidade ambiental, alinhando-se aos compromissos de redução de gases de efeito estufa. Este estudo teve como objetivo principal avaliar a variabilidade espacial do estoque de carbono (EC) do solo na camada de 0-60 cm de profundidade entre os sistemas de Integração Pecuária-Floresta (IPF), agricultura e Pastagem, e analisar a relação do carbono total com variáveis físico-químicas do solo. Para isso, foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm e realizadas as análises para determinação de diversos atributos físico-químicos. A Análise de Componentes Principais (PCA) foi empregada para identificar os atributos que mais contribuíram para a variabilidade das propriedades do solo entre os manejos. Posteriormente a análise de correlação de Spearman foi utilizada para verificar a correlação do carbono total com os atributos do solo em cada sistema. As médias de estoque de carbono foram comparadas estatisticamente pelo teste não paramétrico Mann-Whitney ( $p < 0,05$ ). Os resultados da PCA indicaram que atributos como a saturação de alumínio, alumínio, matéria orgânica (MO), pH, e teores de bases (cálcio, magnésio, potássio), além das frações texturais e enxofre, foram os principais determinantes da variabilidade dos atributos do solo nos sistemas avaliados. A análise de correlação demonstrou que a MO apresentou a maior correlação positiva e significativa com o carbono total em todos os manejos (IPF, agricultura e Pastagem). Em contraste, o alumínio e a saturação de alumínio exibiram consistentemente correlações negativas com o carbono. As correlações de outros atributos variaram entre os sistemas: a areia correlacionou-se negativamente no sistema de Agricultura e Pastagem, mas não no IPF, e o potássio não teve correlação significativa na Pastagem. Quanto aos estoques de carbono do solo (0-60 cm), o manejo em Agricultura registrou o maior valor médio ( $117,22 \text{ t ha}^{-1}$ ), seguida pelo IPF ( $107,5 \text{ t ha}^{-1}$ ) e Pastagem ( $93,17 \text{ t ha}^{-1}$ ), revelando que os EC diferem estatisticamente entre si, dependendo do manejo e características físico-químicas de cada área. Os sistemas de manejo em Agricultura e IPF demonstram maior potencial de manutenção ou incremento de carbono no solo em comparação com o manejo de Pastagem na área estudada. A matéria orgânica é o principal fator que influencia o estoque de carbono em todos os manejos, reforçando a importância de práticas agrícolas que visem ao seu acúmulo para a sustentabilidade dos agroecossistemas.

**Palavras-chave:** Mudanças climáticas, Estoque de Carbono, Carbono total, Sistemas de manejo.

## ABSTRACT

Soil carbon stock is a crucial indicator of soil health and an important component in mitigating climate change, being directly influenced by land use and management practices. Low-carbon agriculture and livestock aim to reconcile food production with environmental sustainability, aligning with commitments to reduce greenhouse gases. This study aimed primarily to evaluate the spatial variability of soil carbon stock (EC) in the 0–60 cm depth layer among Livestock–Forest Integration (IPF), agriculture, and Pasture systems, and to analyze the relationship of total carbon with soil physicochemical variables. To this end, soil samples were collected at depths of 0–20, 20–40, and 40–60 cm and analyses were performed to determine various physicochemical attributes. Principal Component Analysis (PCA) was employed to identify the attributes that most contributed to the variability of soil properties among the management systems. Subsequently, Spearman’s correlation analysis was used to verify the correlation of total carbon with soil attributes in each system. The mean carbon stocks were statistically compared using the nonparametric Mann–Whitney test ( $p < 0.05$ ). The PCA results indicated that attributes such as aluminum saturation, aluminum, organic matter (OM), pH, and base contents (calcium, magnesium, potassium), in addition to textural fractions and sulfur, were the main determinants of the variability of soil attributes in the evaluated systems. The correlation analysis showed that OM had the highest positive and significant correlation with total carbon in all managements (IPF, agriculture, and Pasture). In contrast, aluminum and aluminum saturation consistently exhibited negative correlations with carbon. Correlations of other attributes varied among systems: sand correlated negatively in the Agriculture and Pasture systems, but not in IPF, and potassium had no significant correlation in Pasture. Regarding soil carbon stocks (0–60 cm), Agriculture management recorded the highest mean value (117.22 t ha<sup>-1</sup>), followed by IPF (107.5 t ha<sup>-1</sup>) and Pasture (93.17 t ha<sup>-1</sup>), revealing that the EC differ statistically from each other, depending on the management and physicochemical characteristics of each area. The management systems in Agriculture and IPF show greater potential for maintenance or increase of soil carbon compared to Pasture management in the studied area. Organic matter is the main factor that influences carbon stock in all managements, reinforcing the importance of agricultural practices that aim at its accumulation for the sustainability of agroecosystems.

**Keywords:** Climate change; Carbon stock; Total carbon; Management systems.

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 01.** Levantamento do uso de insumos e produção para os anos safras 2021-2021, 2022-2023 e 2023-2024 em cada um dos usos do solo, Integração Pecuária Floresta (IPF), Agricultura e Pastagem.

**Tabela 02.** Características iniciais das propriedades físico-químicas do solo para os usos do solo de IPF, Agricultura e pastagem, nas camadas de 00-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm.

**Tabela 03.** Componentes principais com valores próprios da variância explicada para cada componente principal (PC) e variância acumulada.

**Tabela 04.** Valores médios para as variáveis físico-químicas do solo na profundidade 00-60 cm para os três usos do solo avaliados, Integração Pecuária Floresta (IPF), Agricultura e Pastagem.

**Tabela 05.** Correlação entre os valores padronizados para os componentes CP1 e CP2.

**Tabela 06.** Correlação entre os valores padronizados para os componentes CP3 e CP5.

**Tabela 07.** Coeficiente de correlação de Spearman entre os parâmetros selecionadas do solo e o carbono total (C Total) para os usos do solo de IPF, Agricultura e Pastagem.

**Tabela 08.** Resultados do Teste de Mann-Whitney para o Estoque de Carbono (EC) em Diferentes Sistemas de Usos do solo.

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 01.** Ciclo Biogeoquímico do carbono.

**Figura 02.** Localização da área de estudo, usos do solo: Integração Pecuária e Floresta – IPF (rosa); Pastagem (marrom); Agricultura (cinza). Cidade de Itiquira, estado do Mato Grosso, país Brasil.

**Figura 03.** Classes de Relevo na área de estudo do projeto, Pastagem (preto), Agricultura de grãos (laranja) e Integração Pecuária Floresta (IPF) (rosa).

**Figura 04.** Classificação pedológica do solo da área de estudo, Pastagem (preto), Agricultura de grãos (azul) e Integração Pecuária Floresta (IPF) (rosa).

**Figura 05.** Valores médio de precipitação anual em milímetros (mm) da área de estudo para os anos de 2013 e 2023, Pastagem (preto), Agricultura de grãos (verde) e Integração Pecuária Floresta (IPF) (roxo).

**Figura 06.** Sistemas de manejo e distribuição geográfica dos pontos amostrais (pontos em vermelho) da área de estudo, Integração Pecuária Floresta (IPF) 533 ha (rosa) com 41 pontos, Agricultura de grãos (soja e milho) 4.059 ha (branco) com 256 pontos, Pastagem manejada 2.730 ha (marrom) com 173 pontos.

**Figura 07.** Consórcio de milho com Brachiaria implementado no ano safra 2023 – 2024 para o sistema de agricultura.

**Figura 08.** Estratificação do perfil de amostragem para as profundidades 00-20; 20-40 e 40-60 cm para as amostras deformadas e indeformadas.

**Figura 09.** Esquema para a amostragem de solo para cada pontos de coleta, para coleta de amostras indeformadas (densidade) e deformadas (carbono e fertilidade).

**Figura 10.** Amostra de solo indeformada; Anel volumétrico coletado da forma correta.

**Figura 11.** Pastilhas de amostras de solo preparadas para a leitura no equipamento AGLIBS.

**Figura 12.** AGLIBS - equipamento utilizado as análises de solo.

**Figura 13.** Gráfico dos valores próprios da variância explicada para cada componente principal (PC).

**Figura 14.** Mapa da variabilidade espacial da Matéria Orgânica ( $\text{g dm}^{-3}$ ) do solo para os sistemas de IPF (rosa), Agricultura (azul) e Pastagem (preto).

**Figura 15.** Mapa da variabilidade espacial das concentrações de Fósforo do solo ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) para os sistemas de IPF (rosa), Agricultura (azul) e Pastagem (preto).

**Figura 16.** Mapa da variabilidade espacial do pH ( $\text{CaCl}_2$ ) do solo para os sistemas de IPF (rosa), Agricultura (azul) e Pastagem (preto).

**Figura 17.** Mapa da variabilidade espacial para saturação de bases (V%) do solo para os sistemas de IPF (rosa), Agricultura (azul) e Pastagem (preto).

**Figura 18.** Mapa da da variabilidade espacial da textura do solo para os manejos de IPF (rosa), Agricultura de grãos (laranja); Pastagem (preto).

**Figura 19.** Gráficos dos componentes principais PC1 e PC2 na profundidade de 00-60 cm: A) Scores e distribuição dos pontos amostrais por uso do solo em relação aos teores do solo; B) Loadings PC1 versus PC2. P = Fósforo; S = Enxofre; MO = Matéria Orgânica; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; K = Potássio; Al = Alumínio; CTC – Capacidade de Troca Catiônica; V (%) = Saturação de bases; m (%) = saturação de alumínio; B = Boro; Cu = Cobre; Fe = Ferro; Mn = Manganês; Zn = Zinco; C Total = Carbono Total; EC = Estoque de Carbono.

**Figura 20.** Gráficos dos componentes principais CP3 e CP5 na profundidade de 00-60 cm: A) Scores e distribuição dos pontos amostrais por uso do solo em relação aos teores do solo; B) Loadings PC1 versus PC2. P = Fósforo; S = Enxofre; MO = Matéria Orgânica; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; K = Potássio; Al = Alumínio; CTC – Capacidade de Troca Catiônica; V (%) = Saturação de bases; m (%) = saturação de alumínio; B = Boro; Cu = Cobre; Fe = Ferro; Mn = Manganês; Zn = Zinco; C Total = Carbono Total; EC = Estoque de Carbono.

**Figura 22.** Estoque de carbono total (EC) ( $\text{t ha}^{-1}$ ) no solo por uso do solo na área de estudo para a profundidade de 0-60 cm

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>15</b> |
| <b>2. OBJETIVOS .....</b>  | <b>17</b> |
| 2.1 Objetivo geral .....   | 17        |
| 2.2 Objetivos específicos .....  | 18        |
| <b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>   | <b>18</b> |
| 3.1 Mudanças climáticas.....   | 18        |
| 3.2 Principais eventos que marcaram as discussões sobre o aquecimento global e<br>movimentação política mundial..... | 20        |
| 3.3 Carbono no solo em áreas agrícolas .....   | 22        |
| 3.4 Setor agrícola e o potencial para a redução de emissão de GEE .....  | 24        |
| 3.5 Tipos de solo: Latossolo Vermelho e Neossolo Quartzarênico.....  | 25        |
| 3.6 Crédito de Carbono e seus avanços globais.....   | 26        |
| 3.7 Cenário no Brasil: programas de incentivos e legislação para redução de<br>emissões no setor agropecuário .....  | 27        |
| <b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>   | <b>28</b> |
| 4.1 Descrição área de estudo .....   | 29        |
| 4.1.1 Características físicas do solo na área do projeto .....   | 29        |
| 4.2 Descrição dos usos do solo e seus manejos .....  | 31        |
| 4.2.1 IPF – Integração Pecuário e Floresta .....   | 33        |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.2.2 Agricultura com rotação de soja e milho .....  | 34        |
| 4.2.3 Pastagem manejada .....  | 35        |
| 4.3 Quantificação dos pontos amostrais e amostragem de solo .....  | 36        |
| 4.4 Amostragem de solo .....   | 38        |
| 4.5 Preparo das amostras e análises do solo .....  | 41        |
| 4.5.1 Amostras indeformadas: densidade do solo e estimativa do Estoque de<br>Carbono no solo (EC) .....        | 41        |
| 4.5.2 Amostras deformadas: preparo e análises .....  | 43        |
| 4.6 Caracterização inicial das propriedades físico-químico do solo.....  | 45        |
| 4.7 Análises estatísticas e tratamentos dos dados .....  | 46        |
| 4.7.1 Análise de componentes principais (PCA) .....  | 47        |
| 4.7.2 Análise de correlação de Spearman .....  | 49        |
| 4.7.3 Comparação dos estoques de carbono .....   | 50        |
| 4.8 Elaboração de mapas de resultados para textura do solo e estoque de carbono .                              | 51        |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>   | <b>52</b> |
| 5.1 Análise dos parâmetros físico-químicos do solo para os diferentes usos do solo<br>.....                    | 52        |
| 5.2 Textura do solo por uso do solo.....   | 60        |
| 5.3 Variabilidade dos parâmetros: análise componentes principais (PCA).....                                    | 61        |
| 5.4 Índice de Correlação entre carbono total e as variáveis correlacionadas nos<br>componentes principais..... | 67        |

|  |           |
|--|-----------|
| 5.5 Estoque de Carbono do Solo sob Diferentes Usos do Solo ..... | 71        |
| <b>6. CONCLUSÕES.....</b>  | <b>74</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                           | <b>76</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O aquecimento do sistema climático é inequívoco e já alcança aproximadamente 1,1 °C em 2011–2020 em relação a 1850–1900, tendo a influência humana como a principal causa do aumento observado na temperatura, no nível do mar e nas mudanças na criosfera e biosfera (IPCC, 2021; IPCC, 2023). Esse aquecimento já eleva riscos a sistemas naturais e humanos e tende a intensificar impactos como extremos de calor, incêndios e escassez hídrica à medida que a temperatura média global aumenta (IPCC, 2021).

Em escala global, as emissões do setor de Agricultura, Florestas e Outros Usos da Terra (AFOLU) representam parcela significativa do total de GEE, reforçando que opções de manejo sustentável podem reduzir emissões e, ao mesmo tempo, gerar cobenefícios para a segurança alimentar e a resiliência dos sistemas produtivos (IPCC, 2019; IPCC, 2023). Alcançar a estabilização da temperatura exige emissões líquidas zero de CO<sub>2</sub> em escala global; sem isso, o aquecimento continuará a aumentar (IPCC, 2018; IPCC, 2021). As trajetórias compatíveis com a meta de 1,5 °C requerem que o CO<sub>2</sub> chegue a zero líquido antes do conjunto dos demais GEE, com reduções rápidas nesta década e transformações setoriais profundas (IPCC, 2018).

No Brasil, as emissões líquidas caíram 12% em 2023 frente a 2022, somando cerca de 2,3 GtCO<sub>2</sub>e; ainda assim, a agropecuária e a mudança de uso da terra responderam por aproximadamente 74% do total, evidenciando o peso dos sistemas produtivos e da dinâmica de conversão/recuperação de vegetação nativa no balanço nacional (SEEG, 2024). Esse cenário é particularmente relevante diante do próximo ciclo de Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), quando os países deverão apresentar novos compromissos para 2031–2035, alinhados ao objetivo de manter o aquecimento bem abaixo de 2 °C e, preferencialmente, limitado a 1,5 °C (UNFCCC, 2023).

Diante disso, estratégias de agricultura de baixa emissão e melhorias no manejo do solo incluindo recuperação de pastagens, integração lavoura-pecuária-floresta, incremento da matéria orgânica e práticas conservacionista ganham centralidade por combinarem mitigação (redução/remoção de GEE), adaptação e ganhos de produtividade, reduzindo vulnerabilidades climáticas e contribuindo para metas nacionais e globais (IPCC, 2019; SEEG, 2024).

Segundo Conab (2025), estima-se que a produção total de grãos para a safra 2024/25 seja de 332,9 milhões de toneladas, tendo um aumento de 11,8% em relação à safra anterior e batendo o recorde de produção em 3,7% maior em relação à safra anterior. Para a produção de bovinos de corte o primeiro trimestre de 2025 registou uma produção e 2,44 milhões de toneladas de carne, cerca de 2,7% maior comparada ao primeiro trimestre de 2024 (IBGE, 2025). De acordo com a Embrapa (2024), o Brasil ocupa o primeiro lugar nas exportações de soja e carne desde 2020, sendo o quarto maior produtor de alimentos do mundo devido à grande extensão territorial, clima favorável e investimento que proporcionaram avanços nesse seguimento. A alta produtividade ocorreu devido ao investimento em pesquisas e novas tecnologias que melhoram a produtividade, variedade, e otimização dos recursos como a recuperação de pastagens degradadas.

Segundo o SEEG (2024) para o setor agropecuário as fontes de emissão contabilizadas são as atividades de queima de resíduos agrícolas representando a menor fonte de emissão com 313 mil toneladas de CO<sub>2</sub>, solo manejados sendo a segunda maior fonte de emissão com 187,8 MtCO<sub>2</sub>e sendo essencialmente proveniente do óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), manejo de dejetos animais com 28,8 MtCO<sub>2</sub>e de emissão o que representa 4,6% total desse setor, fermentação entérica que representa a maior emissão (405,1 MtCO<sub>2</sub>e), cultivo de arroz (9,2 MtCO<sub>2</sub>e). O setor agropecuário registrou um aumento no ano de 2023 de 2,2% no aumento das emissões quando comparado ao ano de 2022, registrando o quarto ano consecutivo de aumento (SEEG, 2024).

Pensando nesses problemas, a agricultura e pesquisadores têm buscado meios de melhorar essa situação, enfatizando a redução da emissão de GEE, passando pela conscientização dos envolvidos e pelas mudanças nos modos de produção. A mitigação dos impactos da emissão de GEE é descrita pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas e pela Embrapa como um processo relevante para que o desenvolvimento sustentável seja atingido, resultando no cumprimento de compromissos como os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), previsto pela Organização das Nações Unidas (ONU) na Agenda 2030 (Ornelas *et al.*, 2024).

Segundo a Embrapa (2024), a recarbonização do solo é uma das medidas relevantes para que a agricultura se torne mais sustentável e a emissão de gases do efeito estufa seja reduzida, promovendo assim a saúde do solo agrícola. Esta prática busca utilizar culturas de cobertura no solo, ou seja, utilização de plantas de cobertura entre as safras, protegendo o local de erosões, aumentando a matéria orgânica e o carbono no solo, conseqüentemente estas atividades tendem

a melhorar a produção agrícola, reduzindo o uso de fertilizantes e pesticidas para que o alimento seja de qualidade.

Outro aspecto que pode ser utilizado na mitigação da emissão dos gases de efeito estufa é o uso da agricultura digital ou agricultura 4.0, possibilitando um melhor monitoramento do solo, suas deficiências e possíveis pragas nas plantações. Segundo Viola e Mendes (2024) a exploração da geoengenharia permite que as mudanças climáticas antropogênicas sejam reduzidas, desde que amparadas na redução de emissão de carbono nas produções, suportada pela eficiência no uso de recursos.

Outros sistemas de produção agropecuário podem contribuir na mitigação de GEE, dentre eles: a Integração Lavoura-Pecuária Florestal (ILPF), visando a redução dos gases estufa e o sequestro do carbono no solo e na biomassa das árvores. Esta solução utiliza a introdução de árvores e plantas no manejo agrícola para que a qualidade do solo seja melhorada, assim como a retenção de carbono; a pastagem que quando bem planejada e utilizada auxilia no aumento do estoque de carbono no solo. O controle deste aspecto contribui de forma significativa para que o solo seja estabilizado; e a lavoura possibilitando a rotatividade de culturas, contribuindo para a melhoria orgânica e estrutural do solo, reduzindo a emissão de CO<sub>2</sub> (Souza et al., 2019; Martins et al., 2022; Carvalho, 2023).

Do diagnóstico espacial em nível de talhão ao quadro global de uso da terra, observa-se que a superfície terrestre cumpre duplo papel como fonte e sumidouro de GEE, e já apresenta ampla transformação antrópica (70%). A agricultura domina o uso de água doce e impulsiona a degradação de ecossistemas, mas, quando manejada de forma sustentável, torna-se via efetiva de mitigação e adaptação (IPCC, 2021; 2023). No Brasil, as emissões são historicamente dominadas por Mudança de Uso da Terra e Agropecuária, com recente queda associada à redução do desmatamento na Amazônia e alta no Cerrado, reforçando o papel do manejo do solo e de sistemas integrados para aumentar estoques de carbono e reduzir emissões líquidas (SEEG, 2024).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Quantificar e correlacionar o estoque de carbono (EC) do solo (0-60 cm de profundidade) e as variáveis físico-químicas entre os sistemas de uso do solo: Integração

Pecuária-Floresta (IPF), Agricultura de grãos (soja e milho) e Pastagem, localizados em uma mesma propriedade na região Centro-Oeste do Brasil.

## **2.2 Objetivos específicos**

- Identificar os atributos físico-químicos do solo que podem caracterizar diferentes usos do solo entre os sistemas de IPF, Agricultura e Pastagem;
- Avaliar a correlação do carbono total no solo (0-60 cm de profundidade) com propriedades físico-químicas mais relevantes do solo, em cada um dos sistemas analisados;
- Analisar a distribuição espacial dos atributos físico-químicos e do estoque de carbono para identificar padrões de variabilidade associados aos diferentes sistemas de uso do solo.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 Mudanças climáticas**

As mudanças climáticas observadas na atualidade ocorrem no planeta desde a antiguidade, tendo se intensificado há cerca de 300 anos devido ao desenvolvimento da sociedade, impactando de forma significativa no clima e nas variações de temperatura. Além disso, a revolução industrial, iniciada por volta de 1750, também contribuiu para que as mudanças climáticas ocorressem de forma mais acelerada, devido ao aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera (Rehbein; Ambrizzi, 2025).

O aquecimento global caracteriza-se pelo aumento da temperatura média global, ocasionando mudanças significativas na precipitação de chuva, no prolongamento das secas, no aumento do nível do mar devido ao derretimento das calotas polares, aumento de eventos climáticos como inundações, furacões e ondas de calor, assim esse aumento de temperatura causa uma preocupação constante em nível mundial (Rehbein; Ambrizzi, 2025).

De acordo com Nobre (2024), o aumento da temperatura média global é de 1,1°C desde 1840, com a ocorrência da evolução industrial, evidenciando uma facilidade para que ocorram eventos adversos e extremos no planeta. O autor destaca que em países como os Estados Unidos, Alemanha e Holanda as zonas costeiras têm recebido atenção, buscando-se meios para que a seca e o calor excessivo sejam reduzidos, como também a ressaca que transfere a energia

cinética do vento para os oceanos, podendo aumentar também os casos de tempestades desastrosas.

As mudanças climáticas, associadas à variabilidade da produção agrícola, têm gerado transformações significativas na disponibilidade de grãos e outros alimentos. A emissão de poluentes como metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e ozônio (O<sub>3</sub>) afeta diretamente a produtividade e reduz a oferta de alimentos essenciais para a população mundial, como trigo e arroz (Cintra; Melo; Menezes, 2020). Esse cenário global repercute também na agricultura brasileira, onde alterações climáticas e pressões socioeconômicas têm induzido modificações nos sistemas produtivos ao longo do tempo. Práticas tradicionais, como queimadas e derrubadas de árvores, vêm sendo gradualmente substituídas por cultivos irrigados e técnicas mais avançadas de manejo, incluindo fertilização diferenciada, melhoramento genético e aprofundamento do conhecimento em fisiologia vegetal. Ainda assim, a agricultura nacional permanece como fonte expressiva de gases de efeito estufa, sobretudo em função de mudanças no uso do solo e do consumo energético nos processos produtivos (Assad, 2021).

As mudanças no clima também podem impactar diretamente na segurança alimentar da sociedade, sendo este assunto e suas discussões acerca desta preocupação iniciadas por volta de década de 1990, porém, neste período, acreditava-se que as produções se adaptariam de forma simples e eficiente pelos períodos de mudanças. Nesse sentido, os estudos das Mudanças Climáticas na Segurança Alimentar e Nutricional (SAN) tendem a compreender como o acesso aos alimentos de qualidade são impactados pelos efeitos negativos das mudanças climáticas (Alpino *et al.*, 2022).

A SAN destaca que os movimentos de seca extrema e recorrente, aumento da temperatura global e alterações dos ciclos de vetores de doenças evidenciam um novo cenário para as produções agropecuárias como ocorre por exemplo nas plantações de trigo que são sensíveis a estas modificações e podem ser prejudicadas. Ainda, a questão do aumento da população mundial também impacta neste aspecto, fazendo com que a produtividade agrícola necessite ser aumentada para atender a todos de forma eficiente. Consequentemente, podem ser visualizados agravamentos da má alimentação da população, assim como desnutrição e falta de nutrientes essenciais para o ser humano, possibilitando que a qualidade desses alimentos e dos solos sejam melhoradas e a segurança alimentar seja mantida (Alpino *et al.*, 2022).

Cintra, Melo e Menezes (2020) destacam que a agricultura também contribui para as alterações nas mudanças climáticas, mesmo sendo prejudicada, pois muitos dos processos

realizados na produção acabam por emitir gases do efeito estufa, podendo ser citada a atividade antropogênica, onde grandes quantidades de dióxido de carbono são emitidas diariamente, sendo este gás um dos maiores contribuidores para o efeito estufa.

### **3.2 Principais eventos que marcaram as discussões sobre o aquecimento global e movimentação política mundial**

Diante do contexto de sustentabilidade, a ONU, desde sua criação em 1945, estabeleceu como uma de suas metas a busca pela sustentabilidade, em conjunto com o mundo, assim a Agenda 21, discutida na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento em 1992. Este evento reuniu representantes de 113 países, cientistas e organizações não governamentais, evidenciando um esforço coletivo para que a sustentabilidade fosse atingida, logo foi criada a Declaração de Estocolmo sobre o Meio Ambiente Humano, documento que reconhecia a urgência de se melhorar e proteger o meio ambiente, pensando no mundo que as gerações futuras teriam acesso. Vale mencionar que essa declaração evidenciou um papel relevante para que uma agenda global de proteção ambiental fosse mantida, gerando conscientização dos impactos que o ser humano estava causando à natureza (Ribeiro, 2010).

Já no ano de 1979, foi realizada a 1ª Conferência Mundial do Clima, em Genebra, com o intuito de conscientizar e mostrar a compreensão científica acerca das mudanças climáticas em escalas globais, sendo um evento que reuniu representantes governamentais, cientistas e especialistas em clima. Durante essa conferência, foram discutidos os avanços científicos e suas observações acerca do aumento da concentração de gases estufa na atmosfera, além de suas consequências para o ser humano (Peixer, 2009).

Nesta sequência e com as preocupações acerca das mudanças climáticas, em 1992 foi adotada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), possibilitando a implementação institucional no combate às mudanças climáticas, mostrando-se um marco impulsionador na compreensão científica e das discussões e ações que seriam visualizadas nas próximas décadas (Moreira; Giometti, 2008).

No mesmo ano, ocorreu a Rio 92 (Cúpula da Terra), reunindo líderes mundiais para discussões sobre as medidas tomadas acerca da sustentabilidade e das questões ambientais de cada país, delineando assim a Agenda 21 com metas e estratégias para promoção do desenvolvimento sustentável. A Rio 92 permitiu ainda que a necessidade de proteção ambiental

fosse, de fato, colocada à mostra, servindo como base para outros encontros globais com a mesma temática (Moreira; Giometti, 2008).

No ano de 1995, foi realizada a Conferência das Partes (COP1) em Berlim, marcando o início dos encontros anuais da UNFCCC. Essa conferência teve como objetivo estabelecer uma plataforma de negociações intergovernamentais, enfatizando a cooperação internacional acerca do desenvolvimento de políticas sustentáveis e eficazes, ademais foi instaurada e adotada a Declaração de Berlim, ressaltando a importância de se estabilizar as concentrações emitidas de gases do efeito estufa, deixando a discussão pertinente para os próximos encontros (Faustino; Mantovaneli Junior; Barbosa, 2024; Moreira Junior; Bueno; Silva, 2022).

Em 1997, foi realizada a COP3, conhecida como Protocolo de Kyoto, em Quioto no Japão, com o intuito de estabelecer metas e compromissos para mitigar as emissões de gases do efeito estufa no período de 2008 e 2012, com os países participantes comprometendo-se a reduzir em 5% as emissões, comparando com o ano de 1990 (Godoy, 2005). Este protocolo foi essencial para o enfrentamento das mudanças climáticas, mesmo com seu alcance limitado, devido às metas serem aplicadas apenas a países desenvolvidos, porém os Estados Unidos, grande emissor, acabou por não ratificar o acordo. Vale mencionar que o Protocolo de Kyoto foi substituído em 2015 pelo Acordo de Paris, com mais inclusões acerca do combate às mudanças climáticas (Faustino; Mantovaneli Junior; Barbosa, 2024; Moreira Junior; Bueno; Silva, 2022).

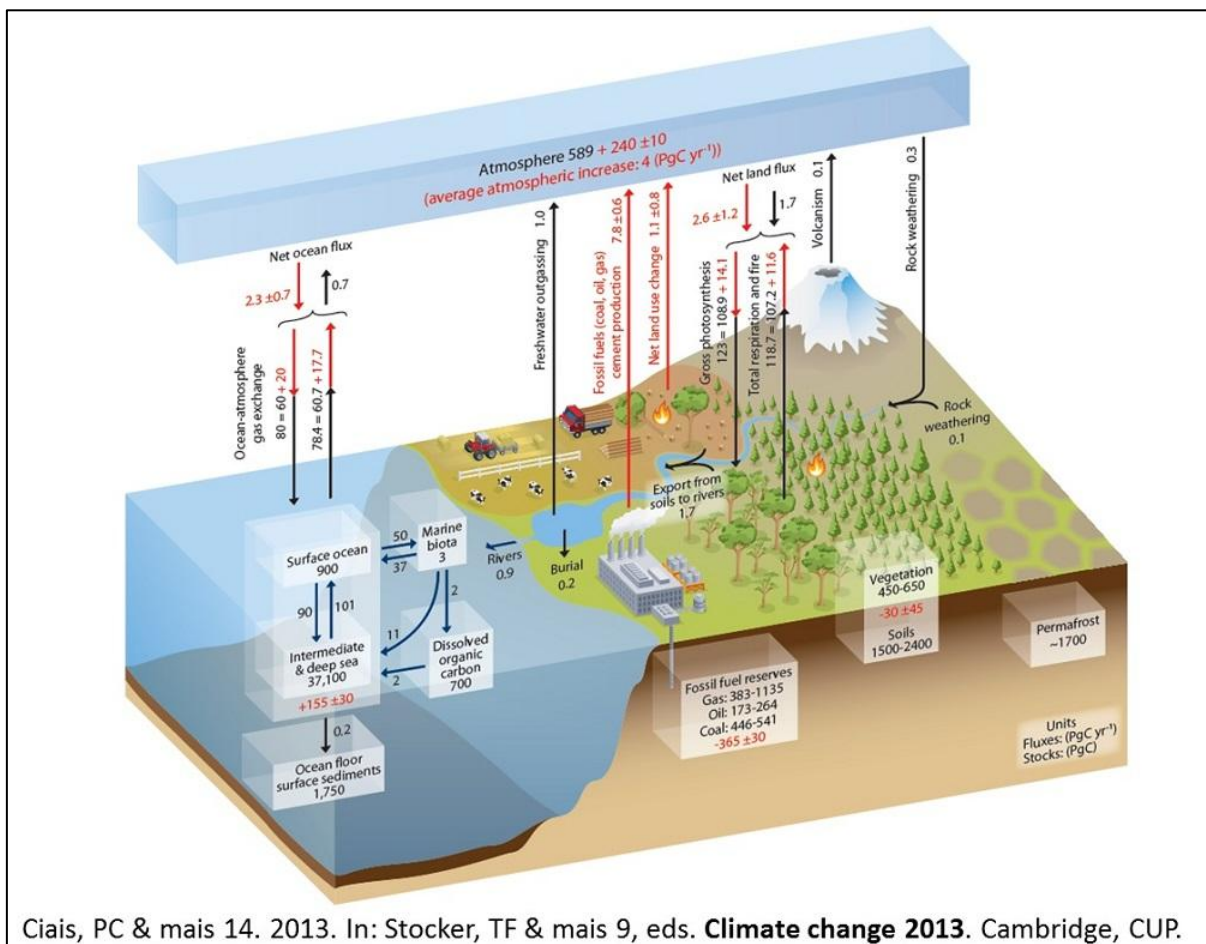
Segundo Faustino, Mantovaneli Junior e Barbosa (2024), com o avanço dessas preocupações, no ano de 2000, a ONU teve como iniciativa a criação dos Objetivos do Desenvolvimento do Milênio (ODM), com o apoio de 191 países, 8 objetivos, 21 metas e 60 indicadores, buscando assim promover a sustentabilidade, erradicar a pobreza e fortalecer a parceria global do desenvolvimento, apresentando grandes progressos nos seus 15 anos de utilização.

Em 2002, a Rio+10 ocorreu, na África do Sul, buscando acordos que melhorassem as necessidades da humanidade para que se evitassem catástrofes em casos extremos. Com isso, em 2012 ocorreu a Rio+20, no Brasil, com o intuito de estabelecer a agenda do desenvolvimento sustentável para os próximos anos, renovando os compromissos políticos com a sustentabilidade e buscando lacunas para implementações de decisões que melhorassem o aspecto sustentável dos países (Faustino; Mantovaneli Junior; Barbosa, 2024).

Essas iniciativas tendem a auxiliar no combate desenfreado dos gases do efeito estufa, todavia necessitam do auxílio dos governantes e de seus representantes para que sejam efetivas e alcancem, de fato, os objetivos previstos nas reuniões e conferências e protocolos.

### 3.3 Carbono no solo em áreas agrícolas

A emissão de carbono ocorre em muitas atividades na economia mundial, conforme o ciclo biogeoquímico (Figura 1), sendo que o solo armazena cerca de quatro vezes mais carbono do que o compartimento da biomassa vegetal. Além disso, as fontes de carbono no solo estão associadas às mudanças nas quantidades de carbono orgânico estocado, dependendo da quantidade de matéria orgânica presente neste solo, juntamente com o clima, atributos do local e do manejo realizado (Fidalgo *et al.*, 2007).



**Figura 01.** Ciclo biogeoquímico do carbono.

Na Figura 1, observa-se os fluxos de carbono, onde o armazenamento deste elemento no solo varia de 1500 a 2400 PgC (pentagramas de carbono). Contudo, em locais na vegetação esse estoque é de 450-650 PgC, demonstrando a relevância do solo em armazenar, de forma primária, o carbono.

O solo apresenta uma dinâmica complexa, quando se analisa o sequestro de carbono, pois este processo depende de inúmeros fatores que vão desde a matéria orgânica decomposta naquele local, até a formação de agregados no solo. Sendo assim, a taxa de sequestro de carbono é influenciada pela interação do material orgânico e com os minerais deste solo, a depender ainda das condições climáticas e ambientais apresentadas (Govers et al., 2017).

Analisando-se este contexto, é evidente que o solo tem muitos compostos em sua composição, como argila e areia, além da matéria orgânica que se adere e apresenta a capacidade de armazenar água e reduzir a perda de partículas e nutrientes nos processos de erosão. Lal (2004) destaca que o solo apresenta diferentes frações de carbono com características distintas de estabilização, podendo serem mencionados o carbono lábil, proveniente da fração mais ativa e de rápida decomposição, e o carbono estável, que como o próprio nome diz, permanece por mais tempo no solo, devido a difícil degradação.

Pereira *et al.* (2013) elencam que o estoque de matéria orgânica em um determinado solo pode ser determinado por uma razão entre a quantidade de carbono adicionada e a perda, assim justifica-se como o carbono influencia em sistemas agrícolas, onde solos com pouco carbono tendem a apresentar baixa produtividade, enquanto solos bem manejados e com quantidades relevantes de carbono apresentam maiores produtividade.

Este fato pode ser observado no trabalho de Xavier (2014), onde o uso da pastagem mostrou-se relevante para que o carbono no solo fosse reduzido, logo, áreas de Mata Atlântica, que foram estudadas apresentaram menores quantidades de carbono do que áreas com manejo reduzido.

À vista disso, o agricultor necessita entender de forma clara como o solo, o carbono e a matéria orgânica (MO) são relevantes para a sustentabilidade da produção agropecuária. Segundo Crespo, Souza e Silva (2023) o sistema de cultivo é influenciado de forma direta pelos resíduos gerados no local, assim quando o solo é bem manejado há um incremento de carbono que auxilia na retenção de umidade e dificulta a erosão.

A partir deste contexto, a textura do solo deve ser analisada, principalmente quando este apresenta argila em sua composição, afinal é ela que tende a estabilizar a matéria orgânica e

consequentemente solos com maiores teores de argila têm maior capacidade de formação de agregados estáveis. Vale mencionar que as altas cargas negativas da argila ligam-se a matéria orgânica presente no solo, formando, portanto, estruturas mais estáveis para o carbono, reduzindo sua decomposição (Jenkinson; Rayner, 1977).

Santon *et al.* (2011) destacam que manejar bem o solo proporciona a preservação da matéria orgânica, assim como bons índices de nitrogênio e carbono, essenciais para uma boa produtividade e para que a sustentabilidade seja mantida.

### **3.4 Setor agrícola e o potencial para a redução de emissão de GEE**

O setor agrícola apresenta diversos modos de manejo de solos disponíveis para plantio, contudo quando se analisa os melhores cenários, é relevante analisar o solo e seus componentes, buscando que a produção seja eficiente, mas ao mesmo tempo sustentável. Solos mais arenosos, por exemplo, são considerados mais frágeis e de difícil capacidade de estocagem de carbono. Já em áreas de agricultura, pode haver a ação de preparo do solo, assim os agregados presentes no solo podem ser quebrados e a MO exposta à oxidação, acelerando a perda de carbono total (Troian *et al.*, 2020).

Ainda, a agricultura conservacionista pode estocar carbono em seus solos de maneira significativa, podendo-se citar as produções cafeeiras, nas quais os manejos priorizam a melhoria do solo e a proteção da superfície, chegam, inclusive, a estocar mais carbono do que as produções convencionais, com camada de 15 centímetros de uma biomassa verde e residual no solo (Anis; Carducci; Ruviaro, 2022).

Segundo Carvalho *et al.* (2010) o carbono, na forma de CO<sub>2</sub>, no solo se movimenta por meio de difusão, locomovendo-se de uma região de maior concentração para uma com menor concentração ou por meio do fluxo de massa, fazendo com que este CO<sub>2</sub> se mova com o ar ao qual está misturado, fato este que auxilia no aumento da temperatura e eleva de forma exponencial a taxa respiratória do solo.

Cerca de 64% dos solos brasileiros com pastagem apresentam algum nível de degradação, reduzindo a produtividade e aumentando as emissões de gases do efeito estufa, intensificando a necessidade e a justificativa de se buscar práticas sustentáveis para este setor. Neste cenário, o sistema IPF (Integração Pecuária-Floresta) se destaca como uma estratégia de produção agrícola que visa à inclusão de produtores de diferentes portes, desde pequenos agricultores familiares a grandes propriedades rurais. Para isso, o IPF não se limita à oferta de

tecnologias, mas enfatiza a provisão de incentivos e o desenvolvimento de programas de capacitação e assistência técnica (Fontaneli, 2019).

Essa abordagem integrada é fundamental para superar barreiras iniciais de investimento e conhecimento, garantindo que as inovações e práticas sustentáveis sejam efetivamente compreendidas, adaptadas e incorporadas no dia a dia da produção, proporcionando uma melhor estrutura do solo, irrigação mais eficaz e sequestro de carbono da biomassa vegetal e do solo, enfatizando o manejo sustentável do solo. A disseminação do IPF, portanto, depende de um arcabouço que promova o acesso equitativo a essas ferramentas e o desenvolvimento de competências para o manejo complexo e multifuncional do sistema, potencializando a eficiência produtiva e os benefícios ambientais (Vinholis, 2021).

### **3.5 Tipos de solo: Latossolo Vermelho e Neossolo Quartzarênico**

O tipo de solo pode influenciar no sequestro de carbono ou no manejo que deve ser realizado. Com isso, o Latossolo Vermelho e o Neossolo Quartzarênico mostram-se com características distintas, mas com papéis significativos no ciclo do carbono (Santos, 2018), correspondendo a maior área de solos neste estudo.

O Latossolo Vermelho é caracterizado por ser um solo rico em alumínio e ferro, além de apresentar ótima capacidade de drenagem de água, estando presente nas regiões subtropicais e tropicais da região central do Brasil. Sua alta acidez e baixa retenção de nutrientes limita a quantidade de matéria orgânica presente no solo, todavia quando manejado de forma correta, este fato tende a ser reduzido, tornando o latossolo adequado para o auxílio no sequestro de carbono (Santos, 2018).

Milne et al. (2013) destacam que o plantio correto e a rotação adequada de culturas são essenciais para que o latossolo torne-se relevante no sequestro de carbono, afinal são estes processos que elevam a matéria orgânica no solo, logo o uso da técnica IPF também melhora este cenário para que a quantidade de carbono sequestrado seja maior.

Segundo Santos (2018), o Neossolo Quartzarênico apresenta-se como um solo arenoso, profundos (em sua grande maioria), com altas concentrações de areia e baixa fertilidade, assim tendem a ter capacidade reduzida para realização do sequestro de carbono. Isto posto, boas práticas agrícolas são cruciais para que o Neossolo se seja produtivo, utilizando de adubações e cultivos de cobertura, melhorando o estoque de carbono desses locais.

O Neossolo apresenta menor capacidade de sequestro de carbono quando utilizado para pastagens, sendo necessário técnicas de conservação mitigando a erosão deste solo que impossibilita e reduz sua capacidade de auxílio neste processo (Milne et al., 2013; Santos, 2018).

Quando se compara os dois solos, diferenças significativas podem ser observadas, sendo o latossolo com maior capacidade de reter carbono do que o Neossolo, fato este justificado pela presença de formação de agregados neste primeiro. Os estudos de Milne et al. (2013) e Santos (2018) destacam a relevância de se manejar corretamente esses solos.

### **3.6 Crédito de Carbono e seus avanços globais**

Os créditos de carbono são caracterizados por serem ferramentas econômicas que auxiliam na mitigação das mudanças climáticas. Deste modo, cada crédito equivale a reduzir ou remover uma tonelada de CO<sub>2</sub> na atmosfera, sendo estes gerados através de projetos como energias renováveis, práticas agrícolas sustentáveis e reflorestamento (Souza, 2007).

Este mercado é dividido em duas vertentes, sendo a primeira voltada ao mercado voluntário, logo, empresas e indivíduos podem comprar créditos de carbono de maneira voluntária, visando a compensação de suas emissões de gases do efeito estufa na atmosfera. Já a segunda liga-se ao mercado regulado, imposto por regulamentações governamentais, assim como ocorre com o mercado europeu e o Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA), exigindo que as emissões sejam compensadas por setores específicos, dentre eles a aviação (Anese, 2024).

Nesse sentido, Milne et al. (2013) destacam que o mercado de carbono vem ganhando destaque nos últimos anos, principalmente no voluntário, demonstrando a preocupação da sociedade com o efeito estufa e as mudanças climáticas associadas a este contexto. Pensando nisso, podem ser citados o Protocolo de Quioto e o Acordo de Paris, ambos voltados ao comprometimento dos países e seus líderes com a redução das emissões de GEE.

Conseqüentemente, a valorização dos créditos de carbono pode ser gerada por práticas agrícolas sustentáveis, enfatizando o plantio direto e a rotação de culturas, ações estas que tem sido cada vez mais utilizadas pelos agricultores, afinal o manejo correto do solo tende a aumentar o sequestro do carbono, colaborando assim a maior sustentabilidade (Milne et al., 2013). A agropecuária pode desempenhar um papel relevante e fundamental no sequestro do carbono, principalmente através de técnicas como a ILPF, o plantio direto e a rotação de

culturas no solo, buscando, portanto, aumentar a quantidade de matéria orgânica nestes locais (Milne et al., 2013).

Além disso, a transparência no processo de adquirir créditos de carbono passa pela medição, relato e verificação (MRV), assim pode-se assegurar que esses créditos estejam de fato reduzindo de forma permanente e consistente as emissões de carbono (Santos; David; Braga, 2023).

### **3.7 Cenário no Brasil: programas de incentivos e legislação para redução de emissões no setor agropecuário**

O Plano ABC e o Programa ABC+, visam priorizar a agricultura de baixa emissão de carbono, mostrando-se um incentivo do governo federal para a sustentabilidade agrícola (Ornelas et al., 2024). O Plano ABC teve o intuito de realizar ações no auxílio da baixa emissão de carbono, incluindo: recuperação de pastagens, o uso de ILPF; difusão da fixação biológica de nitrogênio (FBN); tratamento de dejetos; e expansão das áreas florestais plantadas (IPEA, 2021). Este programa foi implementado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) sendo disponibilizados cerca de R\$2 bilhões para o Plano Agrícola e Pecuário (2010-2011), contudo sua aceitação inicial foi lenta, passando a ter relevância apenas em meados de 2015, já na segunda fase do programa (IPEA, 1990).

O Plano ABC+, de 2020 a 2030 busca integrar a paisagem com as ações para incentivo de tecnologias que reduzam as emissões de gases do efeito estufa em sistemas produtivos, tornando-os mais eficientes e produtivos. Além disso, este plano tem como meta principal reduzir a emissão de carbono em 1,1 bilhão de toneladas até 2030, sendo destacado pelas Nações Unidas devido a seus conceitos de adoção da Abordagem Integrada da Paisagem (AIP), prevendo a gestão integrada da propriedade rural e estimulando o uso eficiente de áreas que estejam aptas para a produção; promoção da recuperação e conservação da qualidade do solo, da biodiversidade e da água, buscando assim valorizar as especificidades locais e regionais de cada solo; combinação de ações que busquem adaptar a produção, garantindo a eficiência produtiva do solo; adoção de práticas conservacionistas, desde que auxiliem no manejo e integração da sustentabilidade para melhoria do desempenho socioeconômico (Nações Unidas Brasil, 2021).

Para estimular novos agricultores a implementar práticas sustentáveis, o plano ABC+ conta com programas e estratégias para captar e incentivar a adoção de novas práticas, dentre

elas podemos citar o programa de acesso à crédito rural disponibilizado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômicos e Social (BNDES) oferecendo linhas de créditos com menores taxas e com maior tempo de carência para pagamento, o que torna um atrativo para os produtores rurais. A estratégia de assistência técnica e extensão rural (ATER), capacitação e transferência de tecnologia, se torna uma ferramenta de extrema importância para incentivar a adoção de práticas sustentáveis, por meio da capacitação da mão-de-obra e dissipação do conhecimento de novas práticas que ofereçam maiores resultados de produtividade aliados com a sustentabilidade dos recursos (Sotta, 2021).

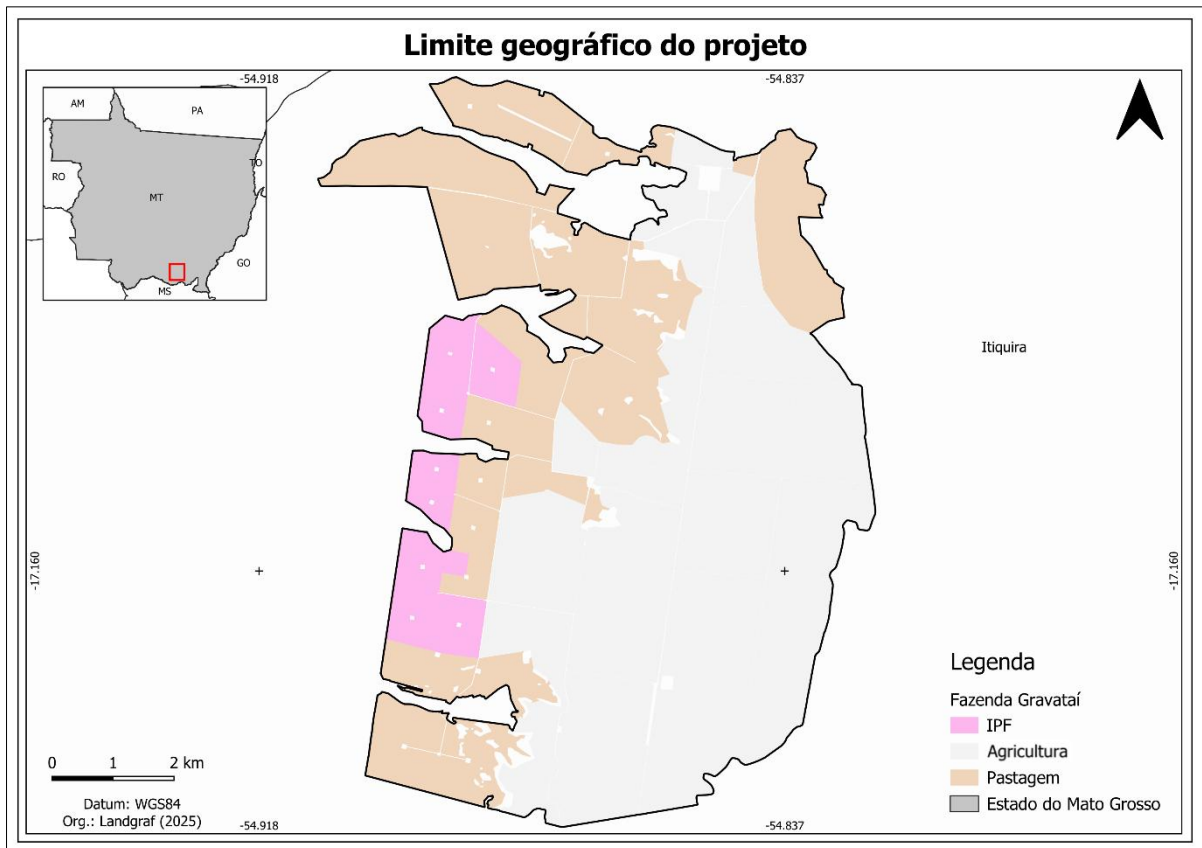
Outro mecanismo fundamental para incentivar uma agricultura mais sustentável reside na geração de créditos de carbono. Estes são certificados transacionáveis que representam a redução ou remoção de uma tonelada de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) da atmosfera, sendo verificados por entidades certificadoras independentes. O valor de tais créditos é variável conforme as especificidades do setor, da atividade e da demanda de mercado. No contexto brasileiro, a Lei nº 15.042, de 8 de janeiro de 2024, surge como um marco regulatório importante ao facilitar e recompensar as atividades privadas que demonstrem suas reduções dos GEE. Essa legislação pode incentivar indiretamente o avanço na adoção de práticas sustentáveis, desenvolvimento de novas tecnologias e investimento monetário nacional e internacional.

As políticas ambientais e agrícolas brasileiras convergem para o compromisso de mitigar as mudanças climáticas. A Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil, no âmbito do Acordo de Paris, estabelece a meta de redução de 50% das emissões de gases de efeito estufa (GEE) até 2030, almejando a neutralidade climática até 2050 (Sotta, 2021). Para o setor agropecuário, esses objetivos são operacionalizados por meio de estratégias como a recuperação de áreas degradadas e a adoção de práticas sustentáveis, que são pilares do Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC+). A realização de eventos internacionais no país, como a COP30 em 2025, poderá intensificar a discussão sobre essas metas e impulsionar a implementação de novos meios de mitigação das emissões para os manejos da agricultura.

#### **4. MATERIAL E MÉTODOS**

#### 4.1 Descrição área de estudo

A área de estudo está situada no município de Itiquira, região Sul do estado de Mato Grosso (Figura 02), com área total de aproximadamente 7.323 hectares. O município possui uma população estimada de 12.236 habitantes e apresenta uma economia predominantemente baseada nas atividades agropecuárias (IBGE, 2025).

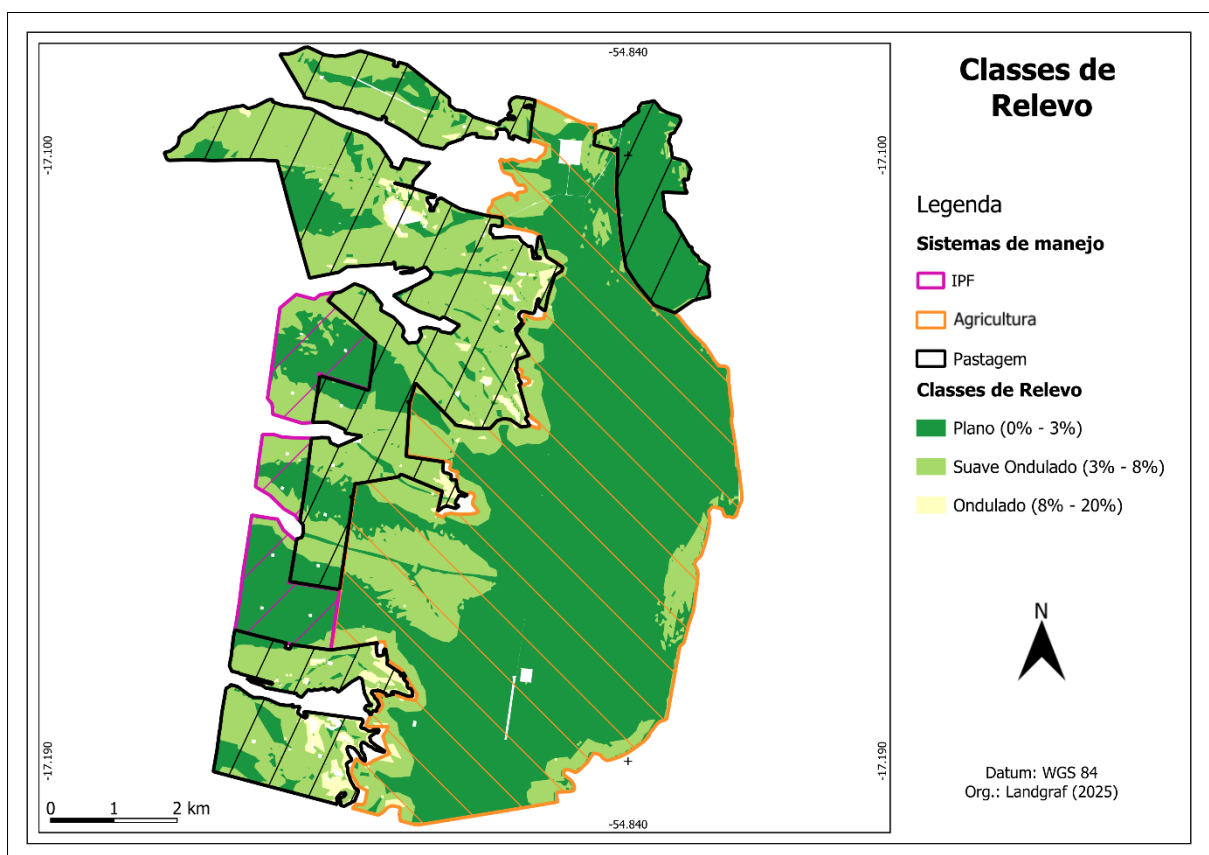


**Figura 02.** Localização da área de estudo, usos do solo: Integração Pecuária e Floresta – IPF (rosa); Pastagem (marrom); Agricultura (cinza). Cidade de Itiquira, estado do Mato Grosso, país Brasil.

##### 4.1.1 Características físicas do solo na área do projeto

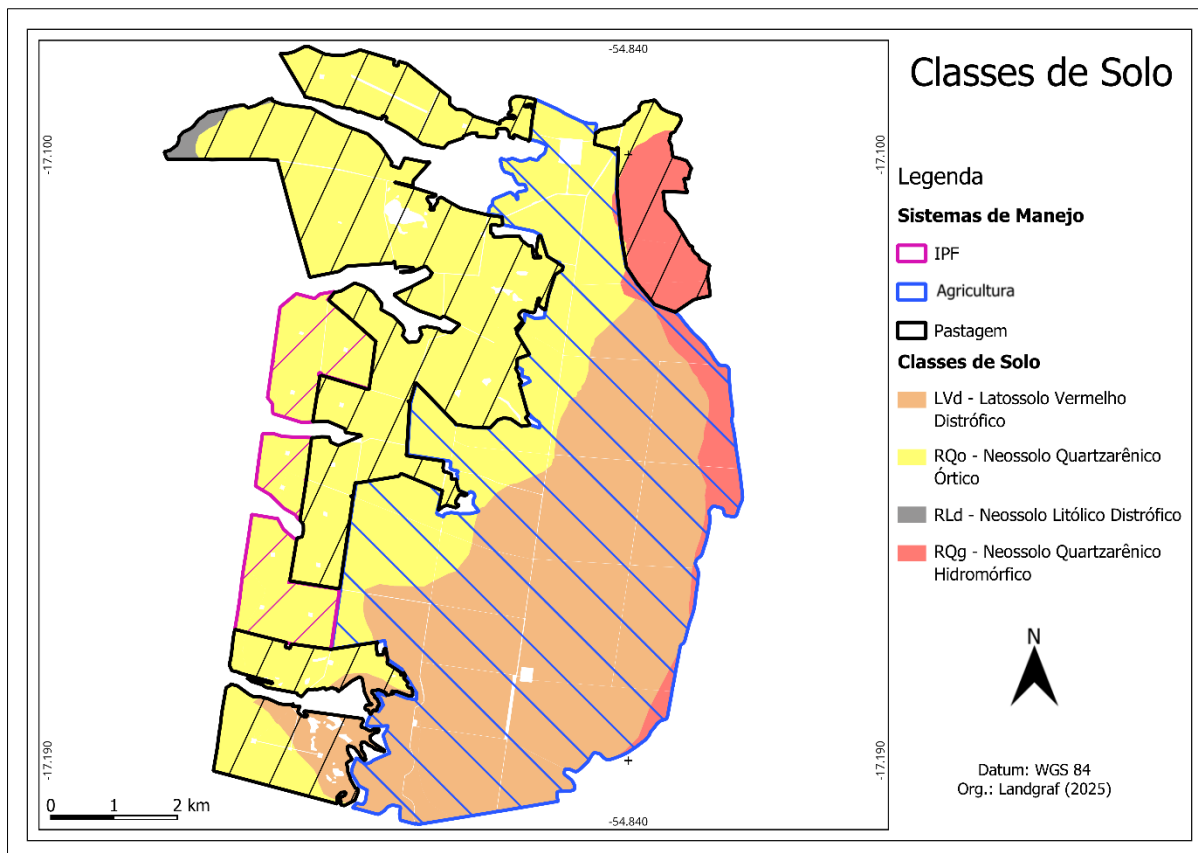
O mapa de declividade foi gerado a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) Copernicus. O programa Copernicus, desenvolvido por meio de uma parceria entre a União Europeia (UE) e a Agência Espacial Europeia (ESA), tem como objetivo fornecer um MDE global, uniforme e de alta precisão, gerado por meio de interferometria de Radar de Abertura Sintética (SAR) (FAHRLAND, 2020).

A classificação da declividade na área do projeto foi adaptada seguindo os critérios estabelecidos no Manual de Levantamento de solo do (Lemos e Santo, 1996; Ramalho Filho e Beek, 1995). A maior parte da fazenda apresenta um relevo classificado como plano (Declividade entre 0% e 3%) com maior aptidão agrícola por ser um terreno plano e facilitar a mecanização das atividades (Ramalho Filho e Beek, 1995), nos usos dos solos de pastagem de IPF o relevo corresponde a áreas com declividade entre 3% a 8% (Figura 03). De maneira geral a área de estudo possui um relevo muito plano o que favorece a agricultura diversas práticas produtivas.



**Figura 03.** Classes de Relevo na área de estudo do projeto, Pastagem (preto), Agricultura de grãos (laranja) e Integração Pecuária Floresta (IPF) (rosa).

A predominância do solo na área da fazenda é de Neossolo Quatzarênico, que ocupa 61,51% da superfície, seguido pelo Latossolo Vermelho Distrófico (LVd), presente em 36,49% da área total, apenas uma pequena região localizada a noroeste da área é caracterizada como Neossolo Litólico Distrófico (RLd) (IBGE, 2023). A distribuição pedológica da área de estudo está ilustrada na Figura 04.



**Figura 04.** Classificação pedológica do solo da área de estudo, Pastagem (preto), Agricultura de grãos (azul) e Integração Pecuária Floresta (IPF) (rosa).

A precipitação da área de estudo foi estimada com os dados disponíveis no site da organização Climate Engine, com resolução espacial de aproximadamente 5 km (Funk et al, 2015; Costa et al, 2019). A precipitação mínima registrada para o ano de 2023 foi de 1.070 mm, sendo que a máxima foi de 1.169 mm.

#### 4.2 Descrição dos usos do solo e seus manejos

A área de estudo do projeto é uma fazenda produtiva que possui três tipos de manejo produtivos, sendo eles: Integração Pecuária e Floresta (IPF) com 533,65 ha, Agricultura de grãos com 4.059 hectares e Pastagem manejada 2.730 hectares (Figura 06). Foi realizado um levantamento histórico dos últimos 3 anos safras (2021-2022; 2022-2023; 2023-2024) com o produtor, buscando quantificar os insumos utilizados por manejo, lotação animal para os sistemas de pastagem e IPF e da produtividade de grãos para o sistema de agricultura (Tabela 01).



**Figura 06.** Sistemas de uso do solo e distribuição geográfica dos pontos amostrais (pontos em vermelho) da área de estudo, Integração Pecuária Floresta (IPF) 533 ha (rosa) com 41 pontos, Agricultura de grãos (soja e milho) 4.059 ha (branco) com 256 pontos, Pastagem manejada 2.730 ha (marrom) com 173 pontos.

**Tabela 01.** Levantamento do uso de insumos e produção para os anos safras 2021-2021, 2022-2023 e 2023-2024 em cada um dos usos do solo, Integração Pecuária Floresta (IPF), Agricultura e Pastagem.

| ANO SAFR A | USO DO SOLO | CULTUR A                             | HISTÓRIC O  | Animais (Cabeças ano <sup>-1</sup> ) | PRODUÇÃO (kg ano <sup>-1</sup> ) | NITROGÊNIO TOTAL (kg ano <sup>-1</sup> ) | TOTAL DE CALCÁRIO - DOLOMÍTICO (kg ano <sup>-1</sup> ) |
|------------|-------------|--------------------------------------|---|--------------------------------------|----------------------------------|--|--|
| 21-20      | IPF         | <i>Eucalypto</i> + <i>brachiaria</i> | As áreas de IPF possuem uma idade média de 5 anos, com manejo anterior de pastagem sem manejo | 2.072*                               | N/A                              | 0  | 0  |
| 22-23      |             | <i>Eucalypto</i> + <i>brachiaria</i> |   | 1,297                                | N/A                              | 142.706*                                 | 0  |
| 23-24      |             | <i>Eucalypto</i> + <i>brachiaria</i> |   | 1,443                                | N/A                              | 39,098                                   | 249.510*   |
| 21-22      | Agricultura | Soja                                 | O manejo de agricultura está instalado a mais de 12 anos, sem informação                      | N/A                                  | 18,713,674                       | 186,399                                  | 0  |
| 21-22      |             | Milho                                |   | N/A                                  | 0                                | 0  | 0  |
| 22-23      |             | Milho                                |   | N/A                                  | 17,320,589                       | <b>370.219*</b>                          | <b>1.521.773*</b>                                      |

|       |          |                   |   |                |                    |                 |                |
|-------|----------|-------------------|---|----------------|--------------------|-----------------|----------------|
| 22-23 |          | Soja              | do manejo anterior  | N/A            | 20.134.005         | 0               | 990.000        |
| 23-24 |          | Milho             |   | N/A            | <b>28.371.276*</b> | 321.232         | 0              |
| 23-24 |          | Soja              |   | N/A            | 16,803,674         | 174             | 300,000        |
| 23-24 |          | <i>Brachiaria</i> |   | N/A            | 0                  | 135             | 88,020         |
| 21-22 |          | <i>Brachiaria</i> | A pastagem é praticada na área por mais de 12, sendo intensificado o manejo | <b>10.449*</b> | N/A                | 0               | 0              |
| 22-23 | Pastagem | <i>Brachiaria</i> |   | 7,372          | N/A                | <b>237.539*</b> | 0              |
| 23-24 |          | <i>Brachiaria</i> |   | 7,849          | N/A                | 86,358          | <b>41.309*</b> |

\* Representa os maiores valores dentre os 3 anos safras por uso do solo.

Ao longo dos últimos 12 anos, a fazenda vem implementando práticas caracterizadas como mais sustentáveis, como a conversão de pastagem para o sistema de IPF, manejo das áreas de pastagens com adubação e controle de pragas, para a agricultura aderiu ao plantio direto, consócio e rotação de culturas.

Os investimentos também foram direcionados para a compra de equipamentos para a aplicação dos insumos em taxa variável, análises de solo com menor frequência de tempo e a utilização da ureia revestida.

#### 4.2.1 IPF – Integração Pecuário e Floresta

O sistema IPF ocupa um total de 533,65 hectares de área (5.336.500 m<sup>2</sup>), composta por *Brachiaria decumbens* e eucalipto (variedade VM01 – *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus camaldulensis*). A localização da área com este uso do solo pode ser visualizada na figura 06. O ano safra 2022 – 2023 teve maior aplicação de nitrogênio total (267 kg N ha<sup>-1</sup>), entretanto o ano safra que teve a maior aplicação de calcário dolomítico nesta área foi 2023 – 2024 com aplicação de 467 kg calcário ha<sup>-1</sup> (Tabela 01). O ano safra 2021 – 2022 foi o que apresentou maior concentração de cabeças de gado com um total de 2.072 cabeças ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> no sistema de IPF, resultando em uma capacidade de suporte de 3,88 cabeças ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Tabela 01).

O sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (IPF) na fazenda foi implementado gradualmente entre 2019 e 2021, convertendo antigas áreas de pastagem. Atualmente, nenhuma extração comercial de madeira foi realizada; o primeiro corte está previsto para 2027 nas áreas implantadas em 2019.

#### 4.2.2 Agricultura com rotação de soja e milho

O sistema produtivo da propriedade está predominantemente voltado para a produção de grãos (soja e milho), com destaque para comercialização e uma pequena parcela destinada para silagem, que é utilizada como complementação da nutrição dos bovinos da fazenda, a área total é de aproximadamente de 4.059 hectares. Devido ao objetivo voltado para a produção de grãos este manejo é o que possui as maiores quantidades de aplicações de insumos e nitrogênio, calcário calcítico e calcário dolomítico (Tabela 01).

Os registros de produção indicam que o ápice de produção de soja ocorreu na safra 2021 – 2022, com 18.713.674 kg, enquanto a maior produção de milho foi alcançada no ano safra 2023 – 2024 com 28.371.276 kg (Tabela 01)., sendo o sistema de agricultura implementado por aproximadamente 12 anos.

Nesse sistema é realizada práticas consideradas mais sustentáveis como plantio direto, agricultura de precisão que envolve amostragem de solo a cada 2 anos e aplicação dos insumos em taxa variável, sendo que ano safra 2023 – 2024 iniciou o consócio de milho com *Brachiaria* em alguns talhões na área de agricultura (Figura 07), essa prática pode contribuir para proporcionar um aumento do aporte de carbono no solo devido a maior produção de biomassa no sistema radicular (Razuk, 2002).



**Figura 07.** Consórcio de milho com Brachiaria implementado no ano safra 2023 – 2024 para o sistema de agricultura.

#### **4.2.3 Pastagem manejada**

A pastagem manejada constitui o segundo maior sistema produtivo da fazenda, ocupando uma área aproximada de 2.730 hectares na qual é plantado a *Brachiaria decumbens* como principal cultivar para a formação dos pastos. Neste sistema, o produtor realiza a aplicação de calcário e fertilizantes com o objetivo de correção da acidez do solo e reposição nutricional, entretanto essa aplicação ocorre em intervalos de tempos irregulares e de forma não uniforme, sendo aplicado em talhões específicos, selecionados após a análise crítica dos resultados obtidos pelas análises de solo.

Para o uso do solo de pastagem, o ano que teve maior aplicação de nitrogênio (237.540

kg) foi em 2022 – 2023, entretanto a maior aplicação de calcário (41.309 kg) ocorreu em 2023 – 2024 (Tabela 01). Sendo que a maior concentração de animais ocorreu no ano safra 2021 – 2022, com cerca de 10.449 cabeças de bovinos na área total para a área de pastagem manejada (2.730 ha), resultando em uma taxa de lotação de 3,8 animais ha<sup>-1</sup>.

De acordo com informações do produtor, o sistema de pastagem na fazenda é adotado há mais de 12 anos, período similar ao sistema agrícola. Historicamente, essas áreas não contavam com manejo ou controle de lotação animal. No entanto, nos últimos 12 anos, práticas de manejo de pastagem foram gradualmente implementadas. Embora a intensidade dessas práticas ainda seja considerada baixa, as pastagens são atualmente categorizadas como manejadas. Há planos para futuros investimentos que visam a intensificação do manejo, buscando otimizar a produtividade de forma sustentável e atender à crescente demanda de mercado por consumidores mais conscientes em relação aos produtos agropecuários.

### **4.3 Quantificação dos pontos amostrais e amostragem de solo**

Para a distribuição e planejamento da malha amostral dos pontos amostrais, utilizou-se o software ArcGIS Pro 3.1, utilizando o sistema de coordenadas geográficas WGS 84 para o georreferenciamento dos pontos, dos quais foram exportados para dispositivos móveis com aplicativos de geoposicionamento, permitindo sua localização precisa durante a fase de campo.

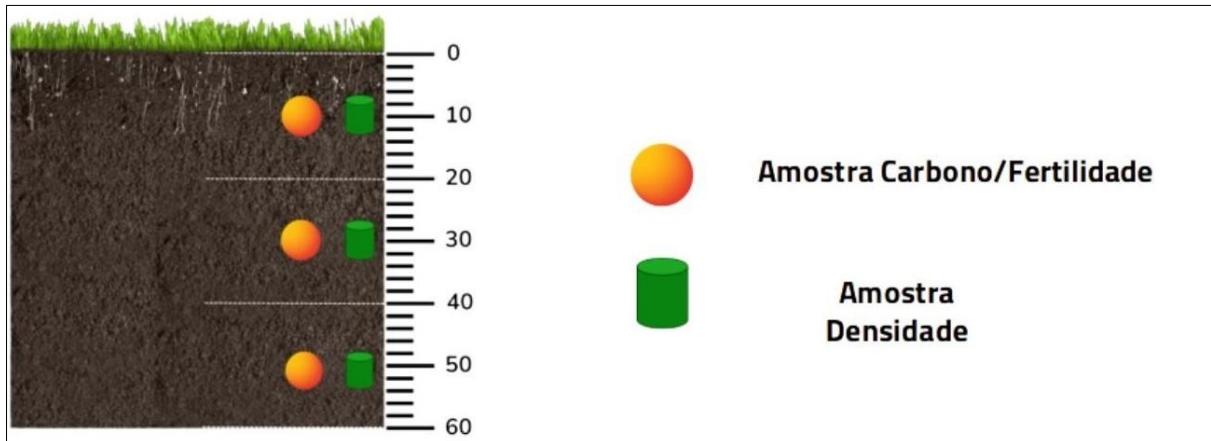
A distribuição dos pontos amostrais para coleta das amostras de solo foi realizada de forma aleatorizada e estratificada por uso do solo. Entretanto o produtor solicitou que fosse realizado um total de 470 pontos amostrais, esse limite foi definido para viabilizar o projeto economicamente.

Desta forma, ao criar os pontos de amostragem foram alocados 41 pontos amostrais para o sistema IPF, 256 para Agricultura e 173 para pastagem (Figura 06). Sendo que a intensidade amostral variou para os usos do solo, com 1 ponto a cada 13 hectares para o IPF e para os sistemas de pastagem e lavoura foi obtido 1 ponto a cada 16 hectares, essa variação de densidade amostral ocorreu devido a ferramenta de aleatorização para a criação dos pontos de amostragem de solo.

Adicionalmente, foram incluídos 3 pontos de referência em áreas de vegetação nativa (designadas como Mata), os quais serviram como controle para ajustes nos cálculos de densidade aparente do solo.

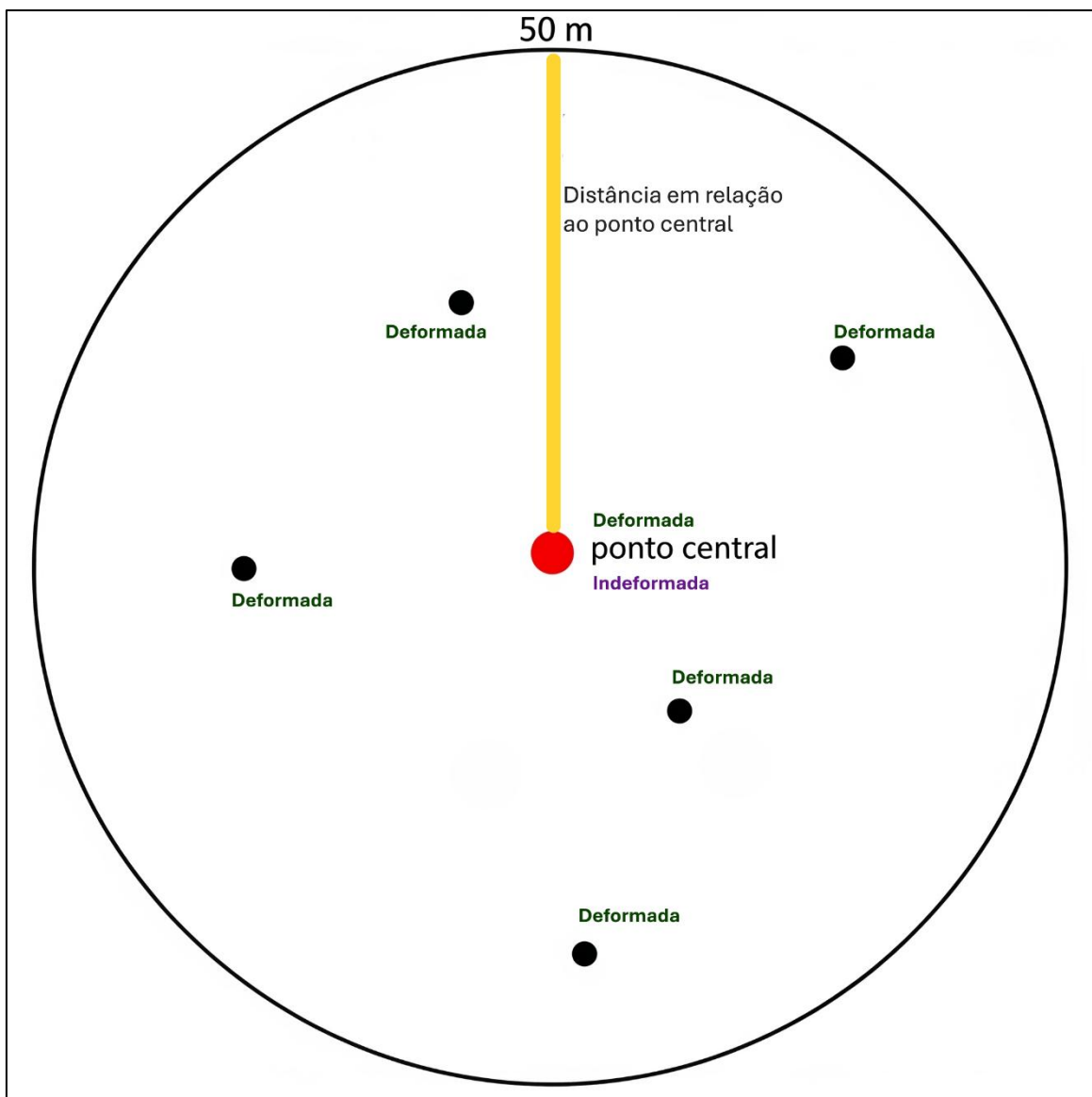
As coletas de solo foram realizadas de 0 a 60 cm de profundidade, estratificada em 3

camadas: 00-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm (Figura 08). Em cada ponto amostral era retirada uma amostra indeformada (densidade) e deformada (carbono e fertilidade) para cada estratificação, totalizando 6 amostras de solo por ponto de coleta.



**Figura 08.** Estratificação do perfil de amostragem para as profundidades 00-20; 20-40 e 40-60 cm para as amostras deformadas e indeformadas.

Em cada ponto de coleta foram retiradas 3 amostras de densidade do solo e 3 amostras compostas para Carbono/Fertilidade, o desenho amostral consiste em um ponto central e georreferenciado na qual é retirado a amostras de densidade do solo e 1 subamostra para carbono/fertilidade. Em seguida, foi definido de forma aleatória mais 5 subpontos espalhados e respeitando um raio de 50 metros em relação ao ponto central, retirando apenas amostras de carbono/fertilidade (Figura 09).



**Figura 09.** Esquema para a amostragem de solo para cada ponto de coleta, para coleta de amostras indeformadas (densidade) e deformadas (carbono e fertilidade).

#### 4.4 Amostragem de solo

A amostragem de solo foi conduzida mediante duas abordagens metodológicas distintas: amostragem indeformada e deformada. Esses procedimentos foram estabelecidos conforme as recomendações técnicas descritas nos seguintes protocolos de referência:

Protocolo para quantificação dos estoques de carbono do solo da rede de pesquisa Pecu (Oliveira et al., 2014);

Protocolo para avaliação do estoque de carbono e nitrogênio do solo em sistemas florestais - Projeto Saltus (Zanatta et al., 2015).

- Amostragem: amostras indeformadas

As amostras indeformadas foram coletadas para determinação da densidade aparente do solo em cada ponto amostral, exigindo rigoroso controle metodológico e com treinamento adequado para a sua execução. A coleta foi realizada mediante utilização de anéis volumétricos de aço inoxidável, com volume médio de 90 cm<sup>3</sup>.

O volume de massa das amostras indeformadas foi variável em função do grau de compactação do solo ocasionado pelo uso do solo e suas práticas. Os equipamentos secundários utilizados foram: Trena, espátula, marreta pequena, saquinho para armazenamento do solo, enxada.

#### Procedimento Operacional Padronizado:

1. Inserção do anel volumétrico na parede do perfil do solo mediante impacto controlado com marreta;
2. Extração do anel contendo a amostra intacta;
3. Nivelamento das extremidades com espátulas para remoção do excesso (Figura 10);
4. Acondicionamento em embalagem plástica;
5. Identificação do ponto de coleta e profundidade amostrada.



**Figura 10.** Amostra de solo indeformada; Anel volumétrico coletado da forma correta.

- Amostragem: amostras deformadas

As amostras deformadas foram destinadas às análises por espectroscopia de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS), com o objetivo de obter os resultados referentes a todos os parâmetros investigados neste estudo. Para a realização da amostragem, foram utilizados os seguintes equipamentos: Enxada, espátula, marreta, trado do tipo sonda com marcações em seu corpo para as profundidades de 0–20, 20–40 e 40–60 cm, baldes para homogeneização do solo, além de sacos plásticos e etiquetas para identificação, estabeleceu-se uma massa mínima de 350 gramas por camada.

O procedimento de coleta consistiu, inicialmente, na remoção da serrapilheira da

superfície do solo no ponto de amostragem. Em seguida, o trado foi inserido verticalmente no solo com o auxílio da marreta até a profundidade desejada. Após a retirada do trado, o solo contido em seu interior foi depositado em um balde previamente identificado com a respectiva profundidade. Esse processo foi repetido em todos os subpontos de coleta. Após a obtenção das amostras, o solo foi homogeneizado em cada balde e, posteriormente, acondicionado em sacos plásticos devidamente vedados e identificados, sendo então encaminhado ao laboratório Agrorobótica para as análises laboratoriais.

#### **4.5 Preparo das amostras e análises do solo**

O preparo das amostras de solo seguiu os procedimentos padronizados da Agrorobótica, empresa acreditada pela ISO/IEC 17025:2017 (INMETRO). Essa certificação, somada ao excelente desempenho da empresa em programas de proficiência do IAC e EMBRAPA, garante a confiabilidade e precisão dos resultados obtidos.

O preparo e a análise das amostras de solo foram realizados conforme o tipo de amostra (deformada ou indeformada), uma vez que cada categoria demanda metodologias específicas, de acordo com os parâmetros a serem avaliados. Essa distinção é essencial para garantir a precisão e a representatividade dos resultados.

##### **4.5.1 Amostras indeformadas: densidade do solo e estimativa do Estoque de Carbono no solo (EC)**

- Densidade do solo

As amostras de solo indeformadas são abertas e levadas a estufa para secagem do material com uma temperatura média de 105°C, por um período de 48 horas até o solo apresentar massa constante, posteriormente a massa seca é pesada em uma balança com precisão de casas decimais (Donagemma et al., 2011). Com a massa seca do solo quantificada e volume conhecido do anel volumétrico é calculado a densidade do solo pela equação:

Equação 1:

$$D_{\text{solo}} = M \div A$$

Onde:

$D_{\text{solo}}$  é densidade do solo (g cm<sup>3</sup>);

M é a massa seca de solo (g);

A é o volume do anel volumétrico (cm<sup>3</sup>)

- Estimativa do Estoque de Carbono (EC) no solo

A estimativa do estoque é calculada com valores de carbono determinados pelas análises LIBS e corrigidos pela densidade do solo e espessura da camada, dado pela seguinte equação:

Equação 2:

$$EC = (OC \times D_{\text{solo}} \times E) \div 10$$

Onde:

EC é o estoque de carbono (Mg ha<sup>-1</sup>);

OC é o teor de carbono no solo (g kg<sup>-1</sup>);

D<sub>solo</sub> é a densidade do solo (g cm<sup>3</sup>);

E é a espessura da camada (m).

No entanto, a utilização de profundidades fixas para o cálculo do estoque de carbono pode levar a comparações inadequadas entre sistemas de uso do solo. Isso ocorre porque diferentes usos do solo tendem a alterar a densidade aparente (também conhecida como densidade do solo), especialmente nas camadas superficiais. Como resultado, usos do solo com maior grau de compactação podem apresentar maiores valores de estoque de carbono para a mesma profundidade, devido à maior massa de solo amostrada. Tais resultados podem superestimar o estoque real e mascarar uma menor taxa de aporte de carbono, levando a conclusões metodologicamente distorcidas.

Para contornar essa limitação, foi aplicada a correção por massa de solo equivalente, conforme proposto por Ellert e Bettany (1995) e adotado por Sisti et al. (2004) e pelo protocolo da Rede PECUS. Essa abordagem utiliza a densidade do solo sob vegetação nativa como referência, assumindo que essa condição representa o estado menos compactado e mais próximo do equilíbrio natural. Assim, os valores de EC das áreas manejadas foram recalculados utilizando a equação 4 para que a massa de solo considerada fosse equivalente à da mata nativa, ajustando-se a espessura da camada conforme necessário, demais detalhes podem ser consultadas sobre o método de correção nas referências citadas neste parágrafo.

Equação 4:

$$C_S = \sum_{i=1}^{n-1} C_{Ti} + \left[ M_{Tn} - \left( \sum_{i=1}^n M_{Ti} - \sum_{i=1}^n M_{Si} \right) \right] \times C_{Tn}$$

Onde:

$C_s$  = EC total, em  $\text{mg ha}^{-1}$ , corrigido em função da massa de solo de uma área de referência da mata;

$\sum_{i=1}^{n-1} C_{Ti}$  = somatório dos ECs do solo da primeira à penúltima camada da amostra no uso do solo calculado;

$M_{Tn}$  = massa do solo por área da última camada amostrada no uso do solo calculado;

$\sum_{i=1}^n M_{Ti}$  = somatória da massa total do solo amostrado sob o uso do solo calculado;

$\sum_{i=1}^n M_{Si}$  = somatória da massa total do solo amostrado na área de referência;

$C_{Tn}$  = teor de C do solo na última camada amostrada.

#### 4.5.2 Amostras deformadas: preparo e análises

- Preparo de amostras deformadas

O preparo das amostras deformadas seguiu um procedimento padronizado e validado pela empresa Agrorobótica. Essa padronização é de suma importância, pois a técnica LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) possui alta dependência da matriz da amostra, tornando a uniformidade no preparo um fator crucial para a precisão do processo analítico. Para mais detalhes sobre as etapas de preparo, bem como os procedimentos envolvidos na leitura e obtenção dos resultados das amostras, consulte a metodologia descrita por Guedes (2023).

A amostras de solo são abertas e secas em temperatura ambiente por um tempo mínimo de 72 horas, até atingirem massa constante, posteriormente essa massa é triturada com um moinho de martelo (TECVAl/TE-330) o que também possibilita a homogeneização do solo, em seguida o solo moído é peneirado com uma peneira de 2 mm, o solo com menor partícula é armazenado em saquinho e o restante descartado.

O processo seguinte consiste na remoção de resíduos vegetais presentes nas amostras, em seguida é confeccionada as pastilhas (Figura 11) de amostras por meio da prensagem do solo com uma prensa hidráulica. Essas pastilhas acondicionadas e levadas ao equipamento LIBS para a leitura.



**Figura 11.** Pastilhas de amostras de solo preparadas para a leitura no equipamento AGLIBS.

- Análises de solo pela técnica LIBS

A espectroscopia de plasma induzido por laser (LIBS – Laser Induced Breakdown Spectroscopy) é uma técnica analítica de emissão atômica que utiliza pulsos de laser de alta energia para promover a ablação da amostra e a excitação dos átomos presentes, gerando um espectro de emissão característico da composição elementar do material analisado. Trata-se de um método rápido, direto e multielementar, capaz de analisar amostras sólidas, líquidas ou gasosas com preparo mínimo ou até mesmo dispensando o uso de reagentes químicos, o que elimina a geração de resíduos tóxicos. No contexto agrônômico, a LIBS tem sido amplamente empregada em análises de solos, permitindo a quantificação de diversos elementos, incluindo o carbono em amostras intactas.

Uma das principais vantagens da LIBS é sua capacidade de detectar uma ampla gama de elementos químicos, com mínima ou nenhuma preparação prévia da amostra. Além disso, trata-se de um método rápido, de baixo custo e com potencial para análises *in situ*, o que o torna especialmente útil em estudos ambientais e agrícolas (Miziolek; Palleschi; Schechter, 2006).

Todos os parâmetros químicos e físicos (exceto a densidade do solo) foram analisados pela técnica LIBS, sendo utilizado o equipamento e softwares desenvolvidos pela empresa Agrorobótica Fotônica e Certificações Ambientais, que desenvolveu que construiu um equipamento com foco em minimizar diversos efeitos indesejados, além de propiciar alta escalabilidade de medições, o AGLIBS (Figura 12). Junto com o equipamento, também foram

desenvolvidos algoritmos próprios de análise dos espectros de solos – permitindo a análise de Carbono e Matéria Orgânica (C/MO) e Textura do solo (Areia Total, Argila e Silte), entre outros, condensados no software AGLIBS Data Analysis (AGLIBSDA 2.0).

Sendo possível quantificar os seguintes parâmetros do solo para cada profundidade avaliada (00-20; 20-40; 40-60 cm): pH, fósforo (P), enxofre (S), matéria orgânica (Mo), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), alumínio (Al), capacidade de troca catiônica (CTC), Saturação de Bases (V%), Saturação de Alumínio (m%), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), Argila, Areia, Silte e Carbono Total (C Total).



**Figura 12.** AGLIBS - equipamento utilizado para as análises de solo.

#### **4.6 Caracterização inicial das propriedades físico-químico do solo**

Inicialmente, foi realizada uma caracterização das propriedades físico-químicas do solo em três profundidades nas áreas do estudo, sendo possível verificar os resultados iniciais para argila, silte, areia e a matéria orgânica (MO) (Tabela 02), podendo apresentar a variabilidade dos atributos do solo entre os diferentes sistemas.

**Tabela 02.** Características iniciais das propriedades físico-químicas do solo para os usos do solo de IPF, Agricultura e pastagem, nas camadas de 00-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm.

| Usos do solo      | Argila (g kg <sup>-1</sup> ) |        | Areia (g kg <sup>-1</sup> ) |        | Silte (g kg <sup>-1</sup> ) |       | MO (g dm <sup>-3</sup> ) |      |
|-------------------|------------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------------------|-------|--------------------------|------|
|                   | Média                        | DP     | Média                       | DP     | Média                       | DP    | Média                    | DP   |
| <b>00 - 20 cm</b> |                              |        |                             |        |                             |       |                          |      |
| IPF               | 147,76                       | 45,05  | 789,59                      | 53,78  | 61,07                       | 17,75 | 27,57                    | 4,39 |
| Agricultura       | 423,36                       | 114,96 | 489,12                      | 144,29 | 86,03                       | 42,61 | 29,01                    | 5,44 |
| Pastagem          | 140,65                       | 72,81  | 804,19                      | 91,48  | 53,68                       | 25,42 | 23,29                    | 6,26 |
| <b>20 - 40 cm</b> |                              |        |                             |        |                             |       |                          |      |
| IPF               | 151,22                       | 45,85  | 796,46                      | 54,67  | 50,98                       | 14,80 | 18,91                    | 3,28 |
| Agricultura       | 466,05                       | 121,22 | 446,52                      | 149,67 | 85,94                       | 41,08 | 20,91                    | 4,50 |
| Pastagem          | 153,56                       | 89,26  | 790,41                      | 109,10 | 54,55                       | 26,16 | 16,35                    | 4,95 |
| <b>40 - 60 cm</b> |                              |        |                             |        |                             |       |                          |      |
| IPF               | 166,49                       | 56,16  | 784,15                      | 65,01  | 47,98                       | 18,50 | 13,78                    | 3,09 |
| Agricultura       | 474,97                       | 118,09 | 436,83                      | 145,01 | 86,70                       | 43,28 | 16,60                    | 3,83 |
| Pastagem          | 167,50                       | 94,54  | 779,51                      | 113,26 | 51,54                       | 25,12 | 12,19                    | 4,03 |

DP = Desvio Padrão.

#### 4.7 Análises estatísticas e tratamentos dos dados

Todas as análises estatísticas foram executadas com o auxílio de scripts desenvolvidos em linguagem Python versão 3.11.5, utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado Visual Studio Code (VS Code) versão 1.100. Os scripts foram desenvolvidos utilizando bibliotecas como SciPy (Jones; Oliphant e Peterson, 2001), NumPy (Oliphant, 2006), Pandas (Mickinney, 2010) e outras, que são utilizadas em diversas pesquisas científicas devido a sua facilidade, ampla documentação, precisão e códigos disponibilizados de forma gratuita pela comunidade (Van Rossum; Drake, 2009).

Para os resultados físico-químicos do solo, a normalidade dos dados de cada camada (00-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm) foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk. Constatou-se que os dados não possuíam uma distribuição normal, o que direcionou a seleção de testes estatísticos apropriados para dados não paramétricos.

Neste estudo, optou-se por apresentar os resultados considerando-se os valores médios de cada parâmetro nas três profundidades avaliadas (0-20, 20-40 e 40-60 cm), apresentando os resultados finais para a média de profundidade total de 00-60 cm por ponto de coleta. Para isso,

foi calculada a média dos valores das três camadas (00-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm), gerando um valor único (00-60 cm) por ponto e por parâmetro, separados pelo tipo de manejo. Posteriormente, o desvio padrão para cada parâmetro avaliado foi calculado por uso do solo.

A identificação de valores discrepantes (outliers) foi realizada pelo método do Intervalo Interquartil (IQR). Este método consiste na delimitação de valores que se situam para além dos limites estabelecidos com base no primeiro quartil (Q1) e no terceiro quartil (Q3), frequentemente definidos por um fator de 1.5 vezes o IQR ( $IQR=Q3-Q1$ ).

Uma vez identificados, os valores outliers foram substituídos pelo valor da mediana dos respectivos parâmetros para cada tipo de uso do solo. Esta abordagem, conhecida como imputação pela mediana, foi escolhida por sua robustez e capacidade de mitigar a influência indevida de observações extremas sobre as estatísticas descritivas (como a média e o desvio padrão) e sobre a performance de modelos subsequentes. Diferentemente da média, a mediana é uma medida de tendência central que não é sensível a valores extremos, garantindo que o valor imputado seja representativo da distribuição central dos dados sem introduzir distorções adicionais. A substituição pela mediana, em vez da remoção dos dados, também contribui para a preservação do tamanho amostral e da integridade do conjunto de dados, essencial para manter a capacidade analítica

Finalmente, todos os resultados foram planilhados e estruturados para serem utilizados nas análises de Componentes Principais (PCA) e correlação, conforme detalhado nos tópicos subsequentes.

#### **4.7.1 Análise de componentes principais (PCA)**

Com o intuito analisar a variabilidade dos parâmetros físicos e químicos do solo e selecionar quais os parâmetros que mais explicam a variabilidade para os diferentes sistemas de uso do solo (IPF, agricultura e pastagem), foi aplicada a Análise de Componentes Principais (PCA). Essa análise estatística permite reduzir a dimensionalidade dos dados, transformando um conjunto de variáveis possivelmente correlacionadas em um novo conjunto de variáveis ortogonais denominadas componentes principais. Esses componentes são ordenados de forma decrescente quanto à variância explicada, sendo que os primeiros (especialmente o primeiro, CP1) concentram a maior parte da variação total dos dados, permitindo a visualização de padrões de agrupamento e correlações entre variáveis (FERREIRA, 2015).

A Análise de Componentes Principais (PCA) foi empregada como uma ferramenta

exploratória para discernir os atributos de maior relevância na explicação da variabilidade dos dados. Tal abordagem objetiva subsidiar a seleção das variáveis que demonstram maior interatividade com o carbono total e o estoque de carbono. A PCA é amplamente reconhecida em diversos estudos pela sua notável capacidade de sintetizar grandes volumes de dados complexos, e seu emprego é consolidado em pesquisas no contexto da agropecuária brasileira.

Os atributos de entrada (parâmetros descritos no item 4.5.2) para esta análise consistiram nos valores médios (00-60 cm) calculados em etapa precedente, abrangendo os três usos do solo em conjunto. Para a realização da PCA, fez-se imperativa a padronização dos dados. Esta necessidade decorre da heterogeneidade nas escalas de medida dos parâmetros analisados. A padronização assegura que todas as variáveis contribuam equitativamente para a análise da PCA, independentemente de suas unidades originais ou faixas de valores, permitindo que a decomposição da variância reflita as relações estruturais intrínsecas entre as variáveis, e não meramente suas diferenças de escala.

Para a padronização dos dados neste estudo, empregou-se o método de Padronização Z-score (ou Normalização Padrão). Este método transforma os dados de forma que cada variável (característica) apresente uma média de zero ( $\mu=0$ ) e um desvio padrão de um ( $\sigma=1$ ). A transformação de cada valor individual ( $x$ ) é realizada de acordo com a seguinte fórmula:

Equação 04:

$$Z = (x - \mu) \div \alpha$$

Onde:

Z é o valor padronizado (Z-score)

x é o valor original da observação

$\mu$  é a média da variável

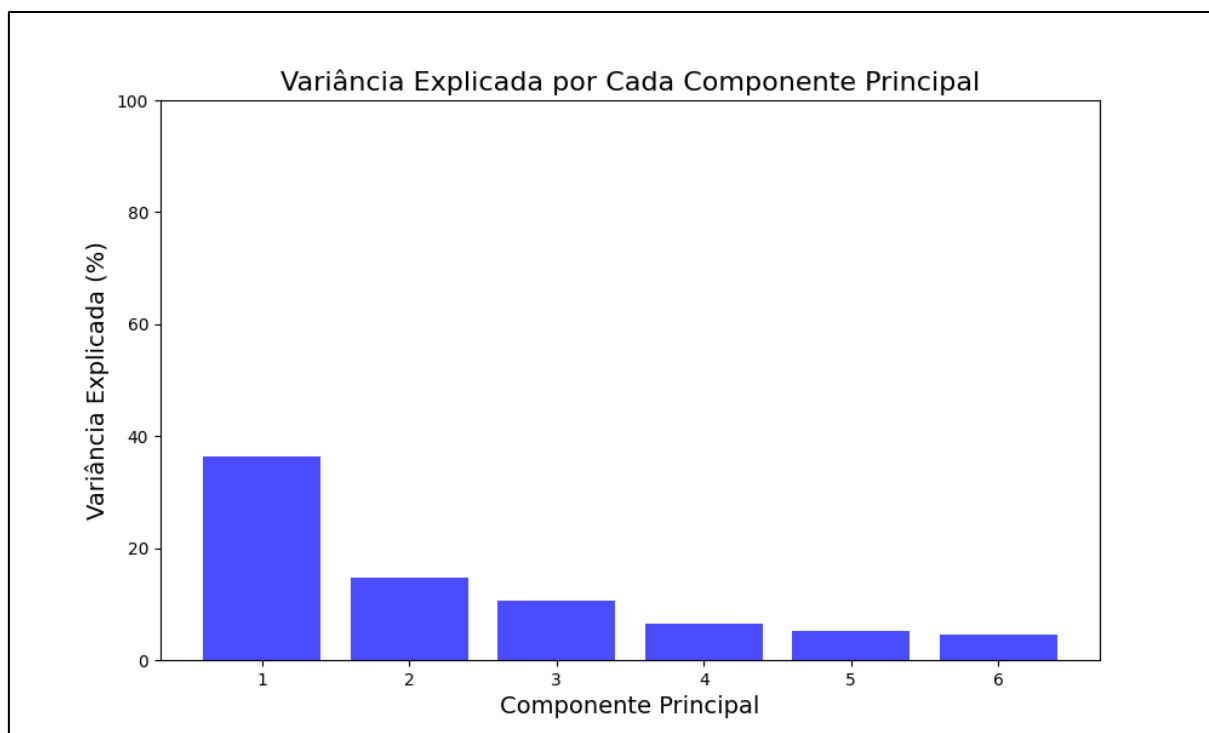
$\alpha$  é o desvio padrão da variável

A variância dos resultados versus o número da componente pode ser visualizada na Figura 13 e Tabela 03, sendo que as 3 primeiras PCs que apresentam os maiores valores da variância explicada dos dados (61,72 %).

**Tabela 03.** Componentes principais com valores próprios da variância explicada para cada

componente principal (PC) e variância acumulada.

| Componente Principal (PC) | Variância Explicada (%) | Variância Acumulada |
|---------------------------|-------------------------|---------------------|
| PC1                       | 36,45                   | 36,45               |
| PC2                       | 14,62                   | 51,07               |
| PC3                       | 10,64                   | 61,72               |
| PC4                       | 6,56                    | 68,27               |
| PC5                       | 5,24                    | 73,51               |
| PC6                       | 4,57                    | 78,08               |



**Figura 13.** Gráfico dos valores próprios da variância explicada para cada componente principal (PC).

Neste estudo, a interpretação da variância dos resultados entre os grupos foi prioritariamente focada nos pares de componentes principais (PCs) PC1 versus PC2 e PC3 versus PC5. Esta seleção foi fundamentada na capacidade demonstrada por estas combinações de componentes em elucidar padrões de agrupamento e separação dos dados, o que facilitou a identificação dos atributos mais influentes na explicação da variabilidade observada e na discriminação eficaz entre os usos do solo estudados.

#### 4.7.2 Análise de correlação de Spearman

Com o intuito de verificar a existência e a intensidade das associações monotônicas entre os atributos físicos e químicos do solo e os teores de carbono (orgânico e total), aplicou-

se a análise de correlação de Spearman. Esta análise estatística é indicada para quantificar a relação monotônica entre duas variáveis (contínuas ou ordinais), sendo calculada com base nos postos (ranks) dos dados. É expressa por meio do coeficiente de correlação de postos de Spearman ( $\rho$  ou  $r_s$ ), que varia de -1 a +1. Valores próximos de +1 indicam uma forte associação monotônica positiva (onde uma variável tende a aumentar consistentemente à medida que a outra aumenta), enquanto valores próximos de -1 indicam uma forte associação monotônica negativa (onde uma variável tende a diminuir consistentemente à medida que a outra aumenta), os valores próximos de 0 indicam fraca ou nenhuma associação monotônica entre as variáveis (Siegel, 1988).

O nível da associação da correlação entre as variáveis fora baseado nos valores padrão de Shimakura (2006), onde: o intervalo de 0,00 a 0,19 possui associação Bem Fraca; de 0,20 a 0,39 possui associação Fraca; de 0,40 a 0,69 apresenta associação Moderada; de 0,70 a 0,89 apresenta associação Forte; e de 0,90 a 1,00 apresenta associação Muito Forte.

Para aferir a significância estatística das correlações observadas, foi adotado o nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ). Assim, associações com valor de  $p$  inferior a 0,05 foram consideradas estatisticamente significativas, indicando que a correlação observada dificilmente ocorreu por acaso.

A aplicação da análise de correlação visa complementar a Análise de Componentes Principais (PCA), fornecendo uma interpretação direta das relações entre variáveis específicas, sendo selecionadas apenas as variáveis que apresentaram valores significativos. Essa abordagem tem sido amplamente utilizada em estudos de solos agrícolas, uma vez que permite identificar variáveis com potencial de uso como indicadores da qualidade do solo.

Desta forma, os parâmetros que apresentaram correlação maior que 0,60 ou menor que -0,60 com as componentes principais 1, 2, 5 e 6 (CP1, CP2, CP5 e CP6), foram: argila, K, MO, C Total, CTC, silte, EC, Ca, S, m%, Al, areia, B, Mn, Cu, V%, densidade e P. Tais parâmetros selecionados, foi verificada a sua correlação com o carbono total do solo (C Total), para cada sistema separadamente.

#### **4.7.3 Comparação dos estoques de carbono**

A existência de diferenças significativas nos estoques de carbono total no solo entre os sistemas de uso do solo foi avaliada por meio do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. A análise foi conduzida com um nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ), no qual a rejeição da

hipótese nula indicando que as medianas dos estoques de carbono nos sistemas estudados não são estatisticamente iguais.

Hipóteses:

Hipótese nula (H0) = As medianas dos estoques de carbono são iguais;

Hipótese alternativa (H1) = Existe diferença significativa entre as medianas dos estoques de carbono, ao nível de 95% de confiança.

Após a identificação de diferenças significativas nos estoques de carbono entre os usos do solo, conforme indicado pelo teste de Kruskal-Wallis, aplicou-se o teste de Mann-Whitney para realizar comparações par a par entre os sistemas. O objetivo foi determinar quais pares de uso do solo apresentavam diferenças significativas, utilizando um nível de significância de 5%.

#### **4.8 Elaboração de mapas de resultados para textura do solo e estoque de carbono**

A espacialização dos resultados referentes à textura do solo e ao estoque de carbono foi realizada utilizando o software de código aberto QGIS, versão 3.34. Essa plataforma foi escolhida por sua robustez, flexibilidade e ampla gama de ferramentas geoespaciais que permitem a análise integrada de dados ambientais e laboratoriais, assegurando a reprodutibilidade das etapas metodológicas.

A geração dos mapas temáticos foi conduzida por meio da técnica de interpolação geostatística Krigagem Ordinária, aplicada diretamente aos valores obtidos nas análises laboratoriais de cada ponto amostrado. O modelo variográfico adotado para a interpolação foi o esférico (Spherical), selecionado com base em seu bom ajuste aos dados e disponível através do plugin Smart Map, instalado no ambiente QGIS.

Os parâmetros selecionados para a elaboração dos mapas temáticos foram o teor de argila, matéria orgânica (MO), pH, saturação de bases (V%), fósforo (P). A escolha do teor de argila se justifica pelo fato de este atributo ter sido utilizado como critério para a definição das áreas avaliadas, conforme informações fornecidas pelo produtor. Já o estoque de carbono foi incluído por representar a variável central deste estudo, permitindo a análise espacial de sua distribuição e a identificação de possíveis padrões relacionados ao tipo de uso e manejo do solo.

Os demais parâmetros foram selecionados para verificar como o uso do solo pode influenciar em sua variabilidade espacial e por apresentarem uma correlação significativa com o carbono total do solo. A classificação dos parâmetros de pH, saturação por bases (V%) e fósforo (P) foi realizada com base nas recomendações do manual Cerrado: Correção do solo e

adubação (SOUSA; LOBATO, 2004).

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 Análise dos parâmetros físico-químicos do solo para os diferentes usos do solo**

O uso do solo da agricultura apresentou a maior média para os parâmetros matéria orgânica (MO), carbono total, estoque de C e saturação por bases (Tabela 04), ou seja, o manejo da área em agricultura está influenciando significativamente os teores desses parâmetros em relação aos demais usos do solo. Segundo Ronquim (2020) a saturação por bases interage de forma complexa com a MO, sendo um indicador para uma boa fertilidade do solo. A área de pastagem apresentou a menor média para MO do solo ( $17,41 \text{ g dm}^{-3}$ ) e maior desvio padrão (3,44), demonstrando que este uso do solo pode proporcionar um menor acúmulo de MO no perfil de 00-60 cm de profundidade. O IPF apresentou um valor intermediário de MO no solo quando comparado como os demais sistemas e com menor desvio padrão, podendo estar associada a integração de dois sistemas e pelo aporte constante de serrapilheira proveniente dos eucaliptos.

**Tabela 04.** Valores médios para as variáveis físico-químicas do solo na profundidade 00-60 cm para os três usos do solo avaliados, Integração Pecuária Floresta (IPF), Agricultura e Pastagem.

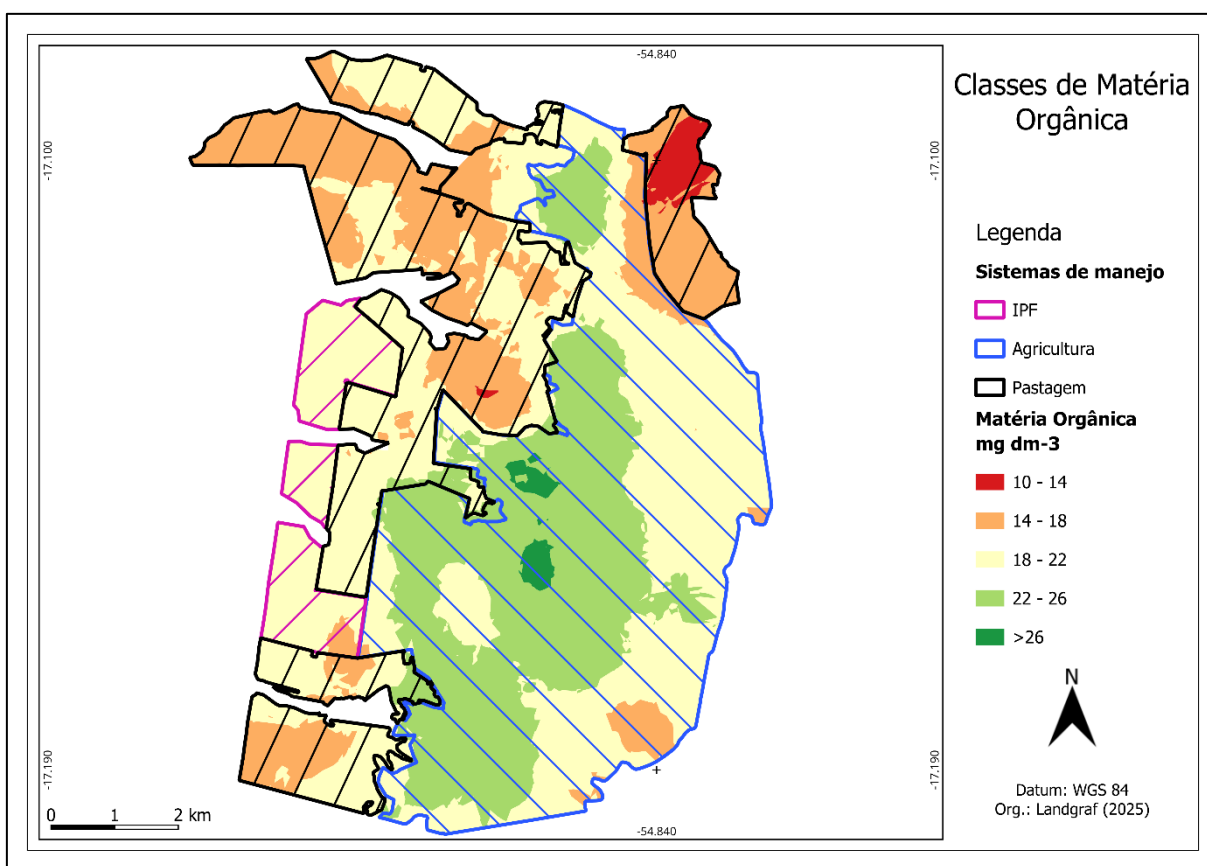
| Parâmetros                      | Sistemas de usos do solo |       |                     |        |                  |       |
|---------------------------------|--------------------------|-------|---------------------|--------|------------------|-------|
|                                 | IPF 00-60cm              |       | Agricultura 00-60cm |        | Pastagem 00-60cm |       |
|                                 | Média                    | DP    | Média               | DP     | Média            | DP    |
| C Total (g kg <sup>-1</sup> )   | 11,44                    | 1,36  | 12,72               | 1,93   | 10,01            | 2,20  |
| EC (T ha <sup>-1</sup> )        | 107,85                   | 15,08 | 117,22              | 19,86  | 93,17            | 23,89 |
| Argila (g kg <sup>-1</sup> )    | 155,09                   | 25,34 | 465,12              | 95,90  | 142,70           | 61,85 |
| Areia (g kg <sup>-1</sup> )     | 792,86                   | 33,20 | 457,49              | 138,01 | 803,44           | 77,36 |
| Silte (g kg <sup>-1</sup> )     | 53,34                    | 11,78 | 86,22               | 36,24  | 51,50            | 19,02 |
| Densidade (g cm <sup>-3</sup> ) | 1,59                     | 0,08  | 1,53                | 0,14   | 1,61             | 0,09  |
| pH (CaCl <sub>2</sub> )         | 4,66                     | 0,17  | 4,85                | 0,12   | 5,07             | 0,25  |
| P (mg dm <sup>-3</sup> )        | 6,04                     | 4,51  | 4,74                | 2,50   | 2,93             | 2,19  |
| S (mg dm <sup>-3</sup> )        | 3,77                     | 2,36  | 42,49               | 28,68  | 1,38             | 0,79  |
| MO (g dm <sup>-3</sup> )        | 19,72                    | 2,34  | 21,97               | 3,39   | 17,41            | 3,44  |
| Ca (cmolc dm <sup>-3</sup> )    | 1,06                     | 0,43  | 1,42                | 0,34   | 1,04             | 0,56  |
| Mg (cmolc dm <sup>-3</sup> )    | 0,48                     | 0,17  | 0,57                | 0,10   | 0,55             | 0,20  |
| K (cmolc dm <sup>-3</sup> )     | 21,30                    | 6,09  | 65,70               | 6,28   | 25,47            | 9,07  |
| Al (cmolc dm <sup>-3</sup> )    | 0,22                     | 0,02  | 0,14                | 0,01   | 0,26             | 0,07  |
| CTC (cmolc dm <sup>-3</sup> )   | 5,32                     | 0,51  | 5,52                | 0,59   | 4,62             | 0,69  |
| V (%)                           | 29,51                    | 8,41  | 38,73               | 7,31   | 36,11            | 13,91 |
| m (%)                           | 16,55                    | 6,35  | 8,36                | 2,10   | 18,38            | 9,82  |
| B (mg dm <sup>-3</sup> )        | 0,09                     | 0,03  | 0,17                | 0,05   | 0,14             | 0,08  |
| Cu (mg dm <sup>-3</sup> )       | 0,16                     | 0,04  | 0,33                | 0,12   | 0,29             | 0,23  |
| Fe (mg dm <sup>-3</sup> )       | 23,94                    | 5,21  | 17,29               | 4,04   | 21,70            | 7,51  |
| Mn (mg dm <sup>-3</sup> )       | 1,69                     | 0,77  | 3,07                | 1,04   | 3,07             | 1,80  |
| Zn (mg dm <sup>-3</sup> )       | 0,62                     | 0,37  | 0,74                | 0,41   | 0,70             | 0,38  |

DV = Desvio-Padrão; P = Fósforo; S = Enxofre; Mo = Matéria Orgânica; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; K = Potássio; Al = Alumínio; CTC – Capacidade de Troca Catiônica; V (%) = Saturação de bases; m (%) = saturação de alumínio; B = Boro; Cu = Cobre; Fe = Ferro; Mn = Manganês; Zn = Zinco; C Total = Carbono Total; EC = Estoque de carbono. Cor verde representa valor maior e cor vermelha valor menor para o parâmetro avaliado.

Na figura 14 é possível visualizar a distribuição espacial dos teores de matéria orgânica no solo (MO) nas três áreas de estudo. A área de pastagem apresenta as menores concentrações de MO, podendo estar associada a prática realizada nessa região e à textura do solo ser mais arenosa (Neossolo Quartzarênico), mesmo que esta área foi implementada a mais de 12 anos e com adubações variáveis de nitrogênio e calcário. A região central do mapa, ocupada pela agricultura apresenta maiores valores de MO, sendo a área manejada por plantio e rotação de

milho e soja e adotado o sistema de plantio direto sem o revolvimento do solo por aproximadamente 12 anos, sendo também uma área com solo mais argiloso (Latossolo Vermelho Distrófico).

Para o sistema de IPF é possível observar valores intermediários para MO do solo, possivelmente devido à transição de uso do solo desta área com idade de estabelecimento de 06 anos predominância de Neossolo Quatizarênico. Sendo que nessa área de IPF os valores de MO foram maiores do que a área de pastagem, possivelmente devido ao não preparo do solo e à entrada de material orgânico proveniente das árvores de eucalipto.



**Figura 14.** Mapa da variabilidade espacial da Matéria Orgânica ( $\text{g dm}^{-3}$ ) do solo para os sistemas de IPF (rosa), Agricultura (azul) e Pastagem (preto).

A matéria orgânica exerce influência direta sobre os teores de carbono total no solo. Assim, práticas de manejo que promovem o acúmulo de MO, como o plantio direto, o consórcio de culturas e a rotação de culturas, especialmente quando aplicadas de forma contínua no sistema de agricultura, tendem a favorecer o aumento do carbono total ao longo do tempo (Sisti et al., 2004), e em sistemas integrados com componente arbóreo, há ganhos adicionais de

estoque de C e de fertilidade em comparação a pastagens degradadas (IPCC, 2019). A recente adoção do consórcio de milho com braquiária em alguns talhões da agricultura pode contribuir positivamente para o aumento dos teores de MO no solo, uma vez que essa prática aumenta a produção de biomassa seca tanto na superfície quanto nas camadas mais profundas do solo, devido ao desenvolvimento radicular mais intenso proporcionado pela braquiária.

Os teores de estoque de carbono e carbono total das áreas de estudo mostram a mesma relação que o teor de matéria orgânica no solo (Tabela 4.), ou seja, apresentam maior concentração no uso do solo de agricultura, menor concentração no uso do solo de pastagem e concentração intermediária no sistema de IPF, sendo o IPF o que apresentou menor variabilidade espacial dos resultados.

O uso do solo de Pastagem apresentou a maior densidade do solo, com um valor médio de 1,61 g cm<sup>3</sup>, seguido pelo sistema de IPF, com valor médio de 1,59 g cm<sup>3</sup> (Tabela 4). Tais resultados para a pastagem podem ser atribuídos à compactação do solo decorrente do pisoteio animal e da concentração de gado, além de não ocorrer preparo ou descompactação mecânica nesta área por longos anos. Em contrapartida, a menor densidade observada no sistema de IPF pode estar associada à presença do componente arbóreo (eucalipto), cujo sistema radicular mais complexo e profundo contribui para a melhoria da estrutura do solo e a redução da densidade. Nossos resultados corroboram achados de Assis (2015), que relatou que sistemas produtivos integrados com eucalipto apresentaram menores valores de densidade do solo e promoveram melhorias significativas na qualidade física do solo.

A área sob uso do solo com agricultura apresentou a menor densidade do solo (1,53 g cm<sup>3</sup>), e maior variabilidade espacial (Tabela 4), podendo esse resultado ser influenciado pelo manejo mais sustentável praticado na fazenda, como rotação de culturas, consócio, plantio direto e plantio de cobertura. A pastagem foi o sistema que apresentou maiores valores de densidade do solo, essa condição pode estar sendo influenciada pelo índice de lotação de animais por hectare e pela baixa variabilidade de espécies de plantas no uso do solo, pois o sistema de IPF apresentou uma densidade do solo menor que pastagem mesmo tendo características similares de textura do solo e a presença de bovinos para a pastagem. Segundo Costa et al. (2009) sistemas integrados podem diminuir a densidade do solo e acarretar o aumento da porosidade do solo. . A compactação do solo influencia diretamente seus atributos físicos, alterando a porosidade e dificultando o crescimento radicular das plantas. Este fenômeno limita o transporte de água e nutrientes para as camadas mais profundas do solo,

impactando negativamente a sua produtividade (Silva et al., 1997), sendo que práticas de rotação de culturas ou uso de subsoladores podem contribuir para reduzir a compactação do solo em áreas de pastagens.

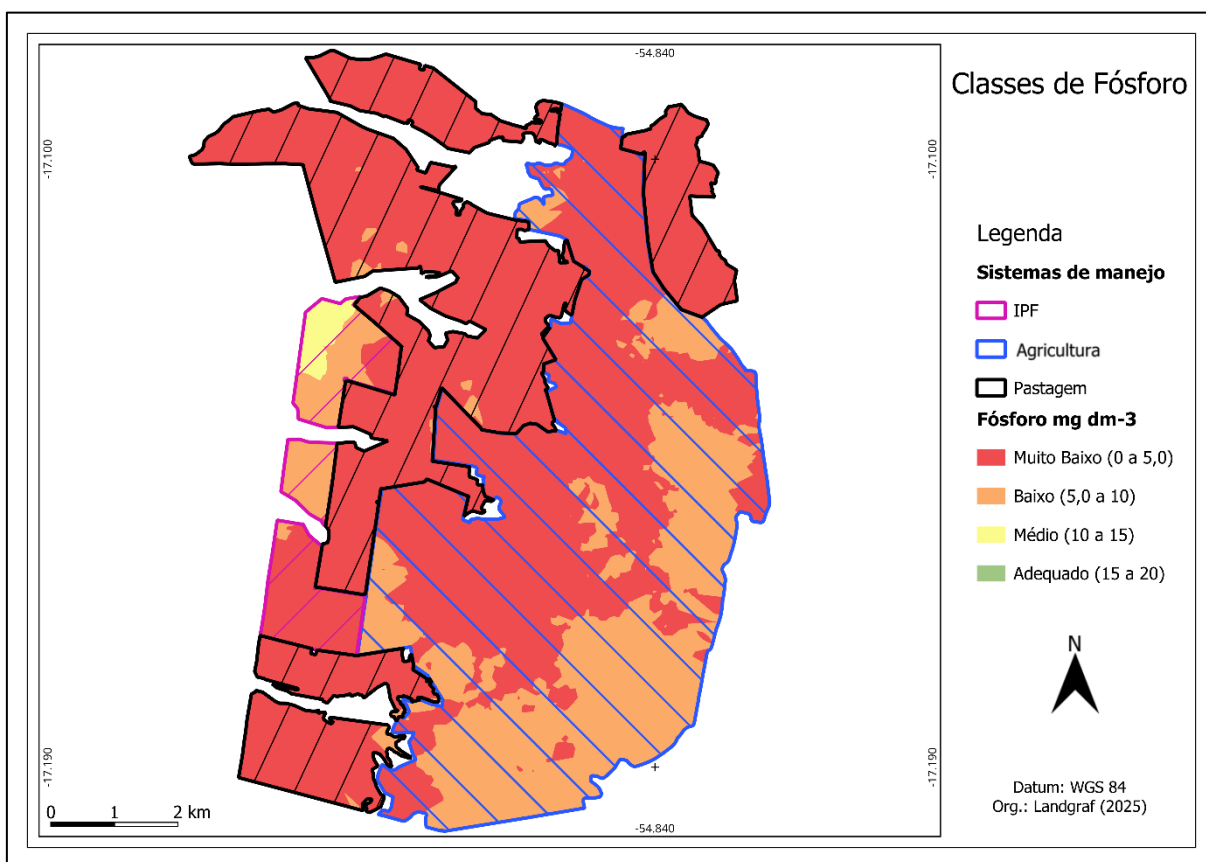
No sistema de uso do solo sob agricultura, observaram-se os menores valores médios de saturação por alumínio e de alumínio trocável, quando comparados aos demais sistemas (Tabela 04). Em contraste, o sistema de pastagem apresentou as maiores médias desses parâmetros ( $Al = 0,26 \text{ cmolc dm}^{-3}$ ). Os baixos teores observados na agricultura estão diretamente relacionados à aplicação sistemática de calcário e gesso para a correção da acidez e da saturação de alumínio do solo. Verificou-se que, nesse sistema de agricultura que a calagem foi realizada em todas as safras avaliadas, enquanto nos demais sistemas a aplicação ocorreu apenas nas safras de 22–23 e 23–24. Além disso, a quantidade de calcário aplicada nos outros sistemas (IPF e pastagem) foi inferior àquela utilizada na agricultura (Tabela 01).

Para a variável capacidade de troca de cátions (CTC) foi observado maiores valores para o sistema de agricultura ( $5,52 \text{ cmolc dm}^{-3}$ ), seguido do sistema de IPF com  $5,32 \text{ cmolc dm}^{-3}$  e pastagem com a menor média ( $4,62 \text{ cmolc dm}^{-3}$ ) dentre os três usos do solo. A diferença da média apresentada no sistema de IPF é relativamente baixa quando comparada com o sistema de agricultura, entretanto a diferença é muito maior quando comparada com a pastagem, indicando que o sistema IPF proporciona melhores teores de CTC para este tipo de solo, provavelmente devido a um manejo diferenciado. A CTC está fortemente correlacionada com a fração argilosa do solo, pois os coloides minerais (argilas) e orgânicos (substâncias húmicas) são os principais responsáveis pela retenção de cátions; assim, maiores teores de argila e de matéria orgânica tendem a elevar a CTC (Ronquim, 2020). Além disso, em Latossolos sob sistemas agrossilvipastoris observa-se aumento de pH, saturação por bases e CTC em relação a pastagens degradadas, evidenciando o efeito do manejo na melhoria desse atributo (Oliveira et al., 2025).

Em relação ao parâmetro de fósforo (P), a maior concentração média foi observada no sistema IPF ( $6,04 \text{ mg dm}^{-3}$ ), enquanto a Agricultura apresentou valores intermediários ( $4,47 \text{ mg dm}^{-3}$ ). A menor concentração média, por sua vez, foi constatada no uso do solo de Pastagem ( $2,93 \text{ mg dm}^{-3}$ ) (Tabela 04), o que indica maior deficiência na disponibilidade desse nutriente no solo para as plantas, sendo que uma possível recomendação de adubação complementar pode trazer benefícios na produtividade dessas pastagens e aumento na capacidade de suporte animal.

Ainda para Fósforo, o sistema de Agricultura apresentou maiores concentrações (média

e baixa) em relação aos outros sistemas (Tabela 4 e Figura 15), apesar da aplicação de nutrientes com maior frequência durante os plantios das culturas. Este resultado pode estar associado à elevada demanda de fósforo por culturas de ciclo curto, como soja e milho, que o demandam grandes quantidades de fósforo ao longo do ciclo produtivo. Em vista desses resultados, a recuperação da disponibilidade de fósforo no solo de modo geral é essencial, podendo ser alcançado por meio da implementação de um planejamento de manejo que inclua o incremento de fósforo no solo com fertilizantes, visando melhorar a sua disponibilidade a longo prazo.



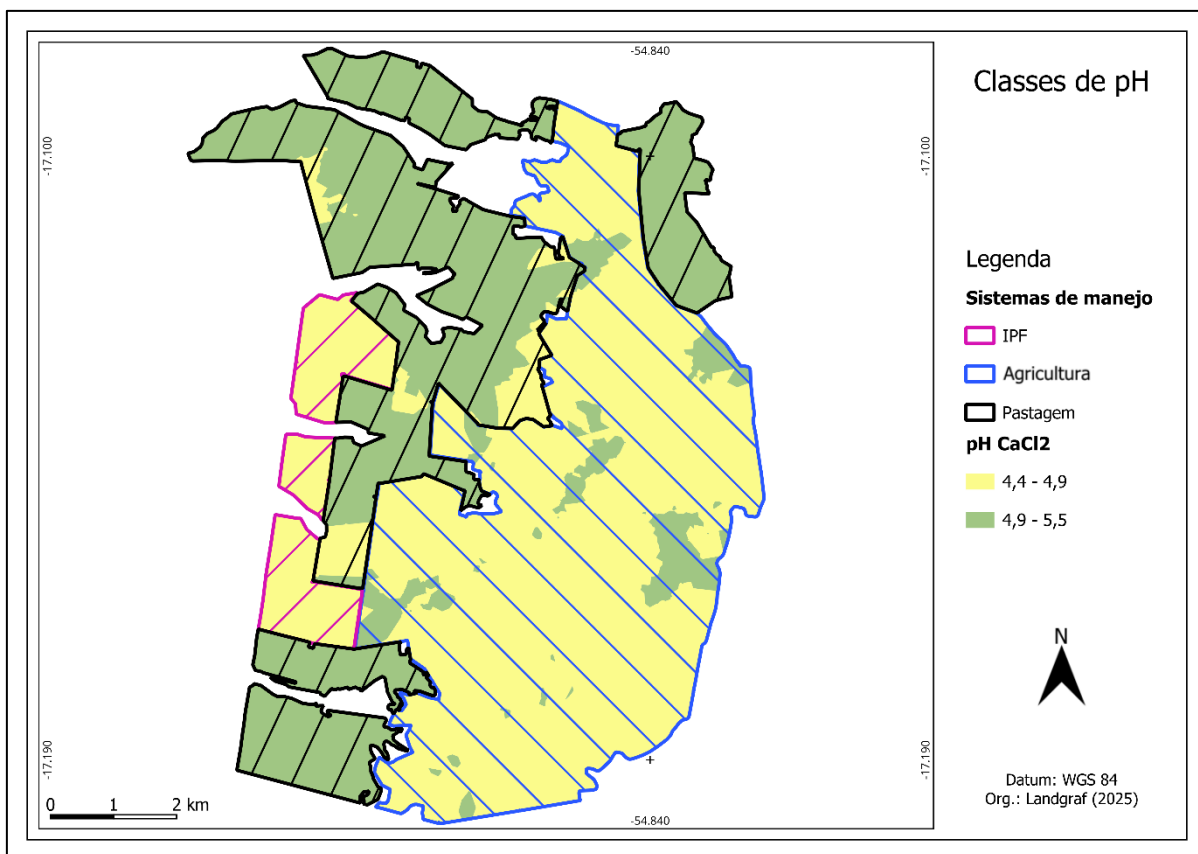
**Figura 15.** Mapa da variabilidade espacial das concentrações de Fósforo do solo ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) para os sistemas de IPF (rosa), Agricultura (azul) e Pastagem (preto).

De modo geral, conforme nossos resultados, independente do manejo e uso do solo, todas as três áreas de estudo analisadas, Agricultura, IPF e Pastagem apresentaram níveis de fósforo no solo baixo e muito baixo, sendo necessário a reposição desse nutriente e a possibilidade de aplicação e reposição de fósforo em taxa variável, principalmente na área de Agricultura, podendo trazer resultados expressivos na produtividade das culturas e animais.

Os valores médios de potássio (K) foram mais elevados no sistema de agricultura (65,7

cmolc dm<sup>-3</sup>). O sistema de Integração Pecuária-Floresta (IPF) apresentou a menor concentração média (21,3 cmolc dm<sup>-3</sup>), já o sistema de pastagem demonstrou uma concentração média de 25,47 cmolc dm<sup>-3</sup> (Tabela 04), essa diferença entre o sistema de pastagem e IPF é muito baixo quando comparados com o sistema de agricultura. Esses resultados refletem, possivelmente, a maior intensidade de adubação potássica no sistema de agricultura.

O pH do solo apresentou valores de baixo (4,4) a médio (5,5) para todas as áreas avaliadas. O uso do solo de IPF apresentou a menor média para pH com 4,66 (em CaCl<sub>2</sub>), sendo que o sistema de pastagem apresentou a maior média com 5,07 (CaCl<sub>2</sub>). O maior desvio padrão na pastagem evidencia uma maior variabilidade espacial, embora a diferença entre os valores médios de pH nos três sistemas seja pequena, todos indicam a necessidade de correção para otimizar a produtividade e maior eficiência nas adubações. De modo geral, a maioria dos cultivos apresenta maior eficiência e produtividade em faixas de pH entre 6,0 e 6,5 (RONQUIM, 2020), o que destaca a importância da calagem. A variabilidade espacial do valores de pH entre os sistemas avaliados também pode ser observada na Figura 16, onde os manejos de agricultura e IPF possuem valores entre 4,4 – 4,9, enquanto a pastagem apresenta menores valores para acidez do solo (4,9 – 5,5). Aplacações de calcário em taxa variável pode ser uma estratégia interessante na economia de recursos e aumento da produtividade agropecuária, além de possibilitar a redução da aplicação de calcário em áreas agrícolas, reduzir custos e reduzir ainda as emissões relativas de CO<sub>2</sub> devido à aplicação deste insumo.



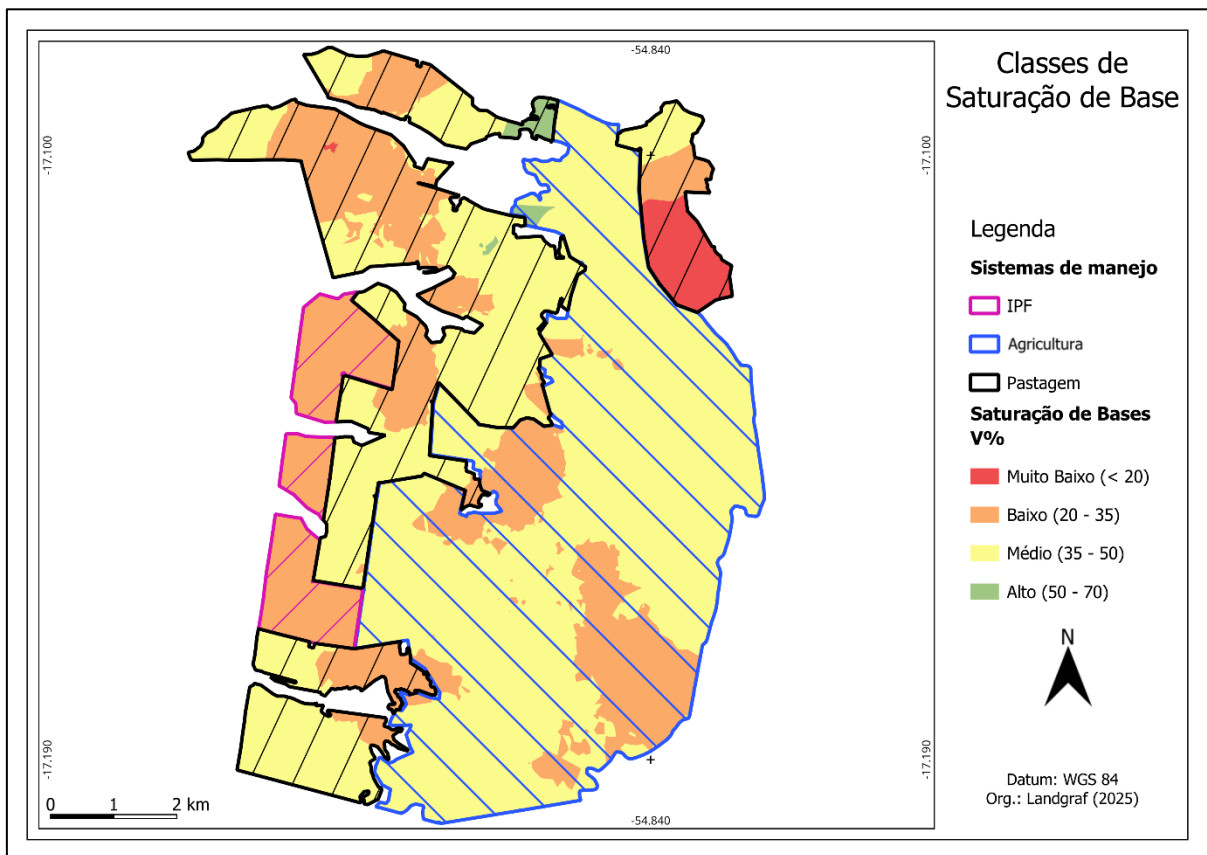
**Figura 16.** Mapa da variabilidade espacial do pH (CaCl<sub>2</sub>) do solo para os sistemas de IPF (rosa), Agricultura (azul) e Pastagem (preto).

A necessidade de correção do pH para a maioria dos solos do Cerrado é um fator limitante para a produtividade das culturas, bem documentado na literatura. Souza e Lobato (2004), por exemplo, enfatizam que a correção da acidez por meio da calagem é uma prática fundamental para o uso eficiente dos fertilizantes e para o aumento da produtividade agrícola em solos com as características observadas neste estudo.

Conforme nossos resultados, a saturação de bases (V%) apresentou a maior média para o uso do solo de Agricultura, com 38,73% e com o menor desvio padrão em comparação aos demais usos do solo. Por outro lado, o IPF foi o uso do solo que apresentou a menor média com 29,51%. O uso do solo de Pastagem, por sua vez, demonstrou a maior variabilidade, com um desvio padrão de 13,91%, sendo quase o dobro do observado no sistema de Agricultura.

Essa variabilidade espacial na saturação de bases para a pastagem é visualmente perceptível na Figura 17, na qual se observa que a região nordeste do mapa, correspondente a uma porção do uso do solo de pastagem, apresenta os menores valores de V% (classificados como "Muito Baixo" < 20%), correspondendo a área com Neossolo Litólico Distrófico. A causa

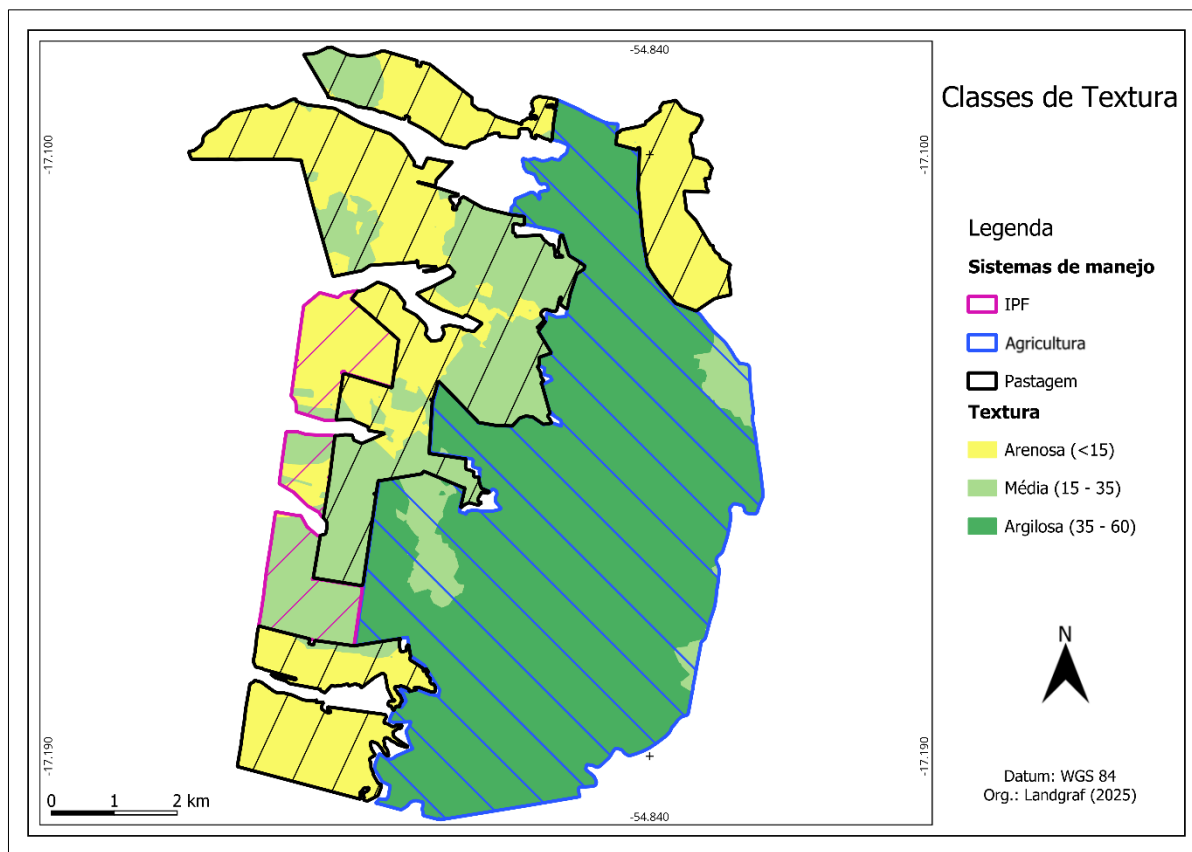
dessa baixa saturação nessa área específica pode estar associada a variações no tipo de solo ou a outras interferências, e a identificação precisa demandaria estudos mais aprofundados.



**Figura 17.** Mapa da variabilidade espacial para saturação de bases (V%) do solo para os sistemas de IPF (rosa), Agricultura (azul) e Pastagem (preto).

## 5.2 Textura do solo por uso do solo

Como mencionado pelo produtor os usos do solo adotados na propriedade foram definidos com base no teor de argila, determinado a partir de diversas amostragens de solo realizadas ao longo do histórico da fazenda. Possibilitando um mapeamento digital dos teores de solo da propriedade, entretanto esse mapeamento só foi realizado até 20 cm de camada de solo. Com o presente estudo, foi possível ampliar a compreensão da textura do solo até a profundidade de 60 cm (Figura 18).



**Figura 18.** Mapa da da variabilidade espacial da textura do solo para os usos do solo de IPF (rosa), Agricultura de grãos (laranja); Pastagem (preto).

Observa-se que o sistema de agricultura apresenta um teor de textura classificado como argilosa, ocupando quase a área total deste uso do solo. Para os sistemas de pastagem e IPF vemos uma variação entre as classes texturais de arenosa para média (Figura 18).

Com esses resultados da variabilidade textural da área de estudo, podemos destacar que o sistema de agricultura possui uma homogeneidade espacial para a textura do solo em relação aos demais usos do solo, assim como apresenta uma textura diferente dos outros sistemas. Podendo influenciar no teor do carbono no solo devido a essa condição física.

### 5.3 Variabilidade dos parâmetros: análise componentes principais (PCA)

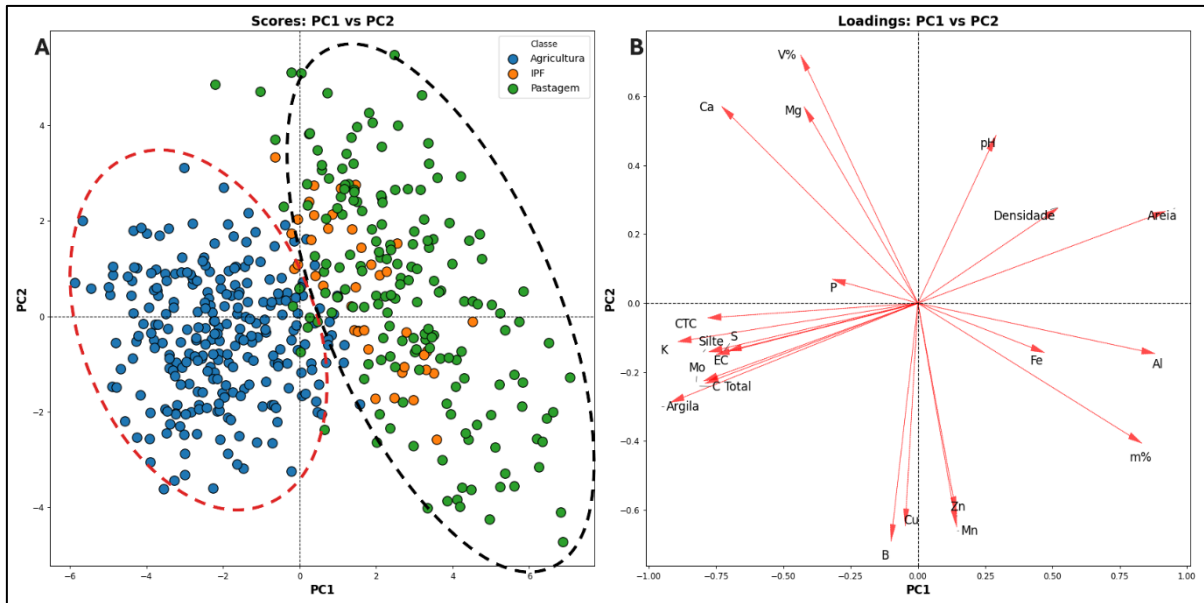
A Análise de Componentes Principais (PCA) revelou que os dois primeiros componentes (CP1 e CP2) foram responsáveis por uma significativa parcela da variância total dos dados, o autovalor para o CP1 é de 0,3645, ou seja, o primeiro componente principal explica aproximadamente 36,45 % da variância total dos dados. Para o PC2 o autovetor é de 0,1462 da

variância total, assim somadas os CP1 e CP2 explicam um total de 51,07 % da variância total do conjunto de dados. Sendo assim a CP1 versus CP2 foi selecionada para a análise dos Loadings e Scores dos resultados.

O PC3 e PC5 também foram selecionadas previamente para a análise dos resultados de Loadings e Scores dos resultados, pois apresenta uma separação dos parâmetros avaliados podendo estar correlacionado com os usos do solo praticados. O PC3 possui um autovalor de 10,64 % da variância do conjunto de dados e a PC5 um autovalor de 5,24 %, somadas as duas PC possuem uma variância acumulada de 15,88 %.

Segundo Borcard et al. (2011), o comprimento do vetor de carregamento (loading) na Análise de Componentes Principais (PCA) é um indicativo do grau de influência e da representatividade de uma variável na variância explicada pelos componentes. A direção do vetor e sua distância em relação ao centro, por sua vez, revela o sentido e da correlação e a intensidade da variável com o componente principal.

Na PC1, para a camada de 00-60 cm (Figura 19B), observa-se que as propriedades de argila, potássio (K), matéria orgânica (MO), carbono total (C Total), CTC (Capacidade de Troca Catiônica), silte, estoque de carbono (EC), cálcio (Ca) e enxofre (S) apresentaram loadings negativos significativos. Estes vetores longos e com orientação para a esquerda do eixo PC1 indicam que essas variáveis contribuem expressivamente para a variância explicada por este componente e estão positivamente correlacionadas entre si.



**Figura 19.** Gráficos dos componentes principais PC1 e PC2 na profundidade de 00-60 cm: A) Scores e distribuição dos pontos amostrais por uso do solo em relação aos teores do solo; B) Loadings PC1 versus PC2. P = Fósforo; S = Enxofre; MO = Matéria Orgânica; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; K = Potássio; Al = Alumínio; CTC – Capacidade de Troca Catiônica; V (%) = Saturação de bases; m (%) = saturação de alumínio; B = Boro; Cu = Cobre; Fe = Ferro; Mn = Manganês; Zn = Zinco; C Total = Carbono Total; EC = Estoque de Carbono.

Em contraste, a saturação de alumínio (m%), o alumínio (Al) e a areia exibiram loadings positivos e relevantes na PC1, com seus vetores apontando para a direita do eixo (Figura 19B). A oposição direcional desses dois grupos de variáveis na PC1 revela uma forte correlação inversa: um aumento nos valores das variáveis com loadings negativos (e.g., argila, MO, C Total) tende a ser acompanhado por uma diminuição nos valores das variáveis com loadings positivos (e.g., m%, Al, areia), e vice-versa.

Conseqüentemente, as amostras que se localizam na porção esquerda do gráfico de escores de PC1 (Figura 19A), caracterizadas por escores negativos elevados neste componente, são predominantemente associadas a altos teores de argila, K, MO, C Total, CTC, silte, EC, Ca e S, e, inversamente, a baixos valores de m%, Al e areia. Esta distinção reflete a capacidade da PC1 em separar os grupos de dados com base nessas características contrastantes do solo.

A análise dos escores na PC1 (Figura 19A) corrobora essa interpretação. Observa-se que as amostras representativas do uso do solo de agricultura exibem uma alta concentração de pontos na porção esquerda do gráfico de escores (indicada pela região circulado em vermelho). Tal posicionamento sugere que este tipo de uso do solo é predominantemente caracterizado por elevados valores dos atributos físico-químicos que apresentaram loadings negativos na PC1

(argila, K, MO, C Total, CTC, silte, EC, Ca e S; Figura 19B).

Em contrapartida, o uso do solo de pastagem demonstra uma concentração de pontos na porção oposta do gráfico de escores (região circulada em preto, Figura 19A). Isso indica que esse sistema está associado a maiores teores dos atributos com loadings positivos na PC1 (m%, Al e areia; Figura 19B), concomitantemente a menores valores daqueles com loadings negativos. Essa clara separação nos escores da PC1 válida a interpretação de que esta componente é eficaz em discriminar as diferentes condições de uso do solo com base no perfil de atributos do solo.

É possível notar que a o que os valores de scores para o sistema de IPF possui uma maior distribuição intermediária para PC1, indicando que esse sistema possui valores intermediários para os parâmetros que apresentaram maiores valores para loadings positivos e negativos (Figura 19A e B).

Analisando o gráfico de loadings (Figura 19B), notamos que os parâmetros de saturação de bases (V%), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) apresentam loadings positivos e significativos para as variáveis que se localizam nesse quadrante. É possível notar que os loadings negativos mais significativos para a CP2 foram boro (B), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn), sendo o boro o parâmetro com o maior vetor em relação ao centro do gráfico.

Para a PC2 não foi possível observar um comportamento na distribuição para os valores dos scores por uso do solo, entretanto é notável que a agricultura possui uma menor dispersão em seus dados quando observado o eixo da PC2 e a pastagem é o que possui maior dispersão nos dados (Figura 19A). Concluindo que o uso do solo da pastagem pode apresentar valores altos para os loadings positivos (V%, Ca e Mg), assim como para os loadings negativos (B, Mn, Cu e Zn) (Figura 19B).

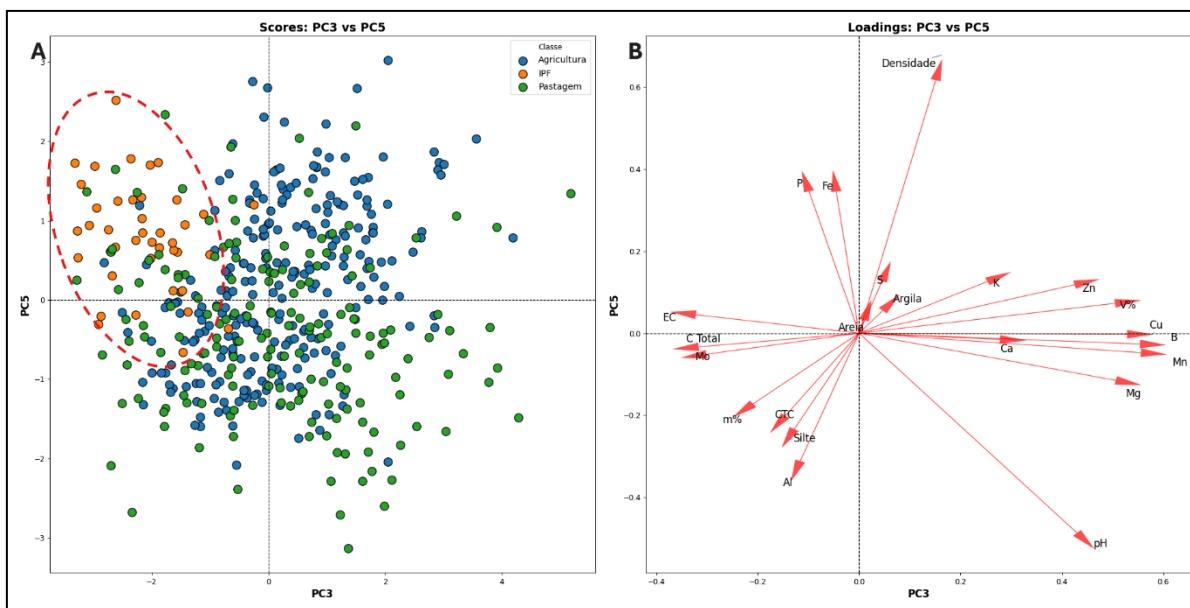
As cargas fatoriais no CP1 revelaram que as variáveis com maior influência positiva foram areia, alumínio e saturação de alumínio, com valores de correlação de 0,87, 0,83 e 0,79 respectivamente. Os parâmetros argila (-0,87), potássio (-0,84), matéria orgânica (-0,75), carbono total (-0,75), capacidade de troca catiônica (-0,73), estoque de carbono (-0,70), cálcio (-0,69) e enxofre (-0,66), apresentaram uma correlação negativa (Tabela 05). Tais parâmetros citados possuem alta correlação, pois apresentaram valores maiores que 0,60 ou menos que -0,60, evidenciados que os dados que estão localizados nesses quadrantes possuem alta correlação com esses parâmetros.

**Tabela 05.** Correlação entre os valores padronizados para os componentes CP1 e CP2.

| Parâmetros | PC1           | PC2           |
|------------|---------------|---------------|
| Argila     | <b>-0,87*</b> | -0,27         |
| K          | <b>-0,84*</b> | -0,11         |
| MO         | <b>-0,75*</b> | -0,21         |
| C Total    | <b>-0,74*</b> | -0,22         |
| CTC        | <b>-0,73*</b> | -0,04         |
| Silte      | <b>-0,73*</b> | -0,13         |
| EC         | <b>-0,70*</b> | -0,14         |
| Ca         | <b>-0,69*</b> | 0,54          |
| S          | <b>-0,66*</b> | -0,13         |
| V%         | -0,41         | <b>0,68*</b>  |
| Mg         | -0,39         | 0,53          |
| P          | -0,27         | 0,06          |
| B          | -0,09         | <b>-0,64*</b> |
| Cu         | -0,04         | <b>-0,60*</b> |
| Zn         | 0,13          | -0,56         |
| Mn         | 0,13          | <b>-0,60*</b> |
| pH         | 0,27          | 0,44          |
| Fe         | 0,42          | -0,13         |
| Densidade  | 0,48          | 0,25          |
| m%         | <b>0,79*</b>  | -0,38         |
| Al         | <b>0,83*</b>  | -0,14         |
| Areia      | <b>0,87*</b>  | 0,25          |

\*Valores em negrito possuem alta correlação. P = Fósforo; S = Enxofre; MO = Matéria Orgânica; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; K = Potássio; Al = Alumínio; CTC – Capacidade de Troca Catiônica; V (%) = Saturação de bases; m (%) = saturação de alumínio; B = Boro; Cu = Cobre; Fe = Ferro; Mn = Manganês; Zn = Zinco; C Total = Carbono Total; EC = Estoque de carbono.

A análise dos escores no plano definido por PC3 versus PC5 (Figura 20A) evidencia uma distinção entre o sistema de Integração Pecuária e Floresta (IPF) e o sistema de Pastagem. As amostras relativas ao uso do solo de IPF demonstram uma distribuição de escores predominantemente na porção negativa do eixo PC3 e positiva do eixo PC5 (região circulada em vermelho, Figura 20A), indicando uma caracterização específica para este grupo.



**Figura 20.** Gráficos dos componentes principais CP3 e CP5 na profundidade de 00-60 cm: A) Scores e distribuição dos pontos amostrais por uso do solo em relação aos teores do solo; B) Loadings PC1 versus PC2. P = Fósforo; S = Enxofre; MO = Matéria Orgânica; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; K = Potássio; Al = Alumínio; CTC – Capacidade de Troca Catiônica; V (%) = Saturação de bases; m (%) = saturação de alumínio; B = Boro; Cu = Cobre; Fe = Ferro; Mn = Manganês; Zn = Zinco; C Total = Carbono Total; EC = Estoque de Carbono.

Deste modo, a posição dos escores no gráfico permite inferir que o uso do solo de IPF, por possuírem escores predominantemente negativos na PC3, estão associados a maiores concentrações de EC, C Total e MO (Tabela 05). Além disso, o agrupamento mais compacto dos pontos do IPF na região circulado em vermelho (Figura 20A) sugere uma menor variabilidade intrínseca para esses parâmetros dentro do próprio manejo, assim como para a densidade do solo (devido aos scores positivos em PC5).

No que se refere à textura do solo (representada por atributos como argila, areia e silte), os vetores de carregamento na Figura 20B demonstram uma contribuição menos significativa para os componentes PC3 e PC5. Isto sugere que, o sistema de IPF proporcione maiores concentrações de MO, EC e C Total em comparação à pastagem, apresentando valores de textura do solo similar. Na Tabela 06 é possível observar os parâmetros que apresentaram correlação para as PC3 e PC5

**Tabela 06.** Correlação entre os valores padronizados para os componentes CP3 e CP5.

| <b>Parâmetros</b> | <b>PC3</b>    | <b>PC5</b>   |
|-------------------|---------------|--------------|
| <b>EC</b>         | <b>-0,32*</b> | 0,04         |
| <b>C Total</b>    | <b>-0,32*</b> | -0,03        |
| <b>MO</b>         | <b>-0,30*</b> | -0,05        |
| <b>m%</b>         | -0,21         | -0,17        |
| <b>CTC</b>        | -0,15         | -0,20        |
| <b>Silte</b>      | -0,13         | -0,23        |
| <b>Al</b>         | -0,12         | -0,31        |
| <b>P</b>          | -0,10         | 0,35         |
| <b>Fe</b>         | -0,04         | 0,35         |
| <b>Areia</b>      | 0,01          | 0,03         |
| <b>S</b>          | 0,05          | 0,13         |
| <b>Argila</b>     | 0,05          | 0,06         |
| <b>Densidade</b>  | 0,15          | <b>0,62*</b> |
| <b>K</b>          | 0,25          | 0,13         |
| <b>Ca</b>         | 0,28          | -0,02        |
| <b>Zn</b>         | 0,43          | 0,12         |
| <b>pH</b>         | 0,43          | -0,49        |
| <b>V%</b>         | <b>0,51*</b>  | 0,07         |
| <b>Mg</b>         | <b>0,51*</b>  | -0,12        |
| <b>Cu</b>         | <b>0,53*</b>  | 0,00         |
| <b>B</b>          | <b>0,55*</b>  | -0,03        |
| <b>Mn</b>         | <b>0,56*</b>  | -0,05        |

\*Valores em negrito possuem alta correlação. P = Fósforo; S = Enxofre; MO = Matéria Orgânica; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; K = Potássio; Al = Alumínio; CTC – Capacidade de Troca Catiônica; V (%) = Saturação de bases; m (%) = saturação de alumínio; B = Boro; Cu = Cobre; Fe = Ferro; Mn = Manganês; Zn = Zinco; C Total = Carbono Total; EC = Estoque de carbono.

#### **5.4 Índice de Correlação entre carbono total e as variáveis correlacionadas nos componentes principais**

Os resultados da análise de correlação de Spearman (Tabela 07) revelaram associações de intensidade variada entre os atributos do solo e o teor de carbono total (C Total), predominantemente classificadas como Bem Fraca ( $r < 0,20$ ), Fraca ( $0,20 \leq r < 0,40$ ) e

Moderada ( $0,40 \leq r < 0,70$ ). Apenas o teor de matéria orgânica (MO) demonstrou uma correlação positiva e estatisticamente significativa em todos os usos do solo, sendo classificada como Muito Forte ( $r \geq 0,90$ ). A forte correlação do MO com o carbono total reflete a sua composição, uma vez que a matéria orgânica é a principal reserva de carbono no solo, resultado similares foram evidenciados em estudos por Aduam et al. (2003) e Silva (2024).

**Tabela 07.** Coeficiente de correlação de Spearman entre os parâmetros selecionadas do solo e o carbono total (C Total) para os usos do solo de IPF, Agricultura e Pastagem.

| Parâmetros | Sistema de uso do solo |                 |                    |              |                 |                    |              |                 |                    |
|------------|------------------------|-----------------|--------------------|--------------|-----------------|--------------------|--------------|-----------------|--------------------|
|            | IPF                    |                 |                    | Agricultura  |                 |                    | Pastagem     |                 |                    |
|            | r                      | P-valor         | Correlação         | r            | P-valor         | Correlação         | r            | P-valor         | Correlação         |
| MO         | <b>1,00</b>            | <b>&lt;0,01</b> | <b>Muito Forte</b> | <b>0,98</b>  | <b>&lt;0,01</b> | <b>Muito Forte</b> | <b>1,00</b>  | <b>&lt;0,01</b> | <b>Muito Forte</b> |
| CTC        | <b>0,58</b>            | <b>&lt;0,01</b> | <b>Moderada</b>    | <b>0,39</b>  | <b>&lt;0,01</b> | <b>Fraca</b>       | <b>0,48</b>  | <b>&lt;0,01</b> | <b>Moderada</b>    |
| K          | <b>0,45</b>            | <b>&lt;0,01</b> | <b>Moderada</b>    | <b>0,17</b>  | <b>&lt;0,01</b> | <b>Bem Fraca</b>   | -0,07        | 0,33            | Bem Fraca          |
| Ca         | <b>0,44</b>            | <b>&lt;0,01</b> | <b>Moderada</b>    | 0,09         | 0,16            | Bem Fraca          | <b>0,34</b>  | <b>&lt;0,01</b> | <b>Fraca</b>       |
| P          | <b>0,35</b>            | <b>0,02</b>     | <b>Fraca</b>       | <b>-0,14</b> | <b>0,02</b>     | <b>Bem Fraca</b>   | 0,05         | 0,49            | Bem Fraca          |
| V%         | <b>0,31</b>            | <b>0,04</b>     | <b>Fraca</b>       | -0,12        | 0,06            | Bem Fraca          | 0,11         | 0,15            | Bem Fraca          |
| Silte      | 0,23                   | 0,15            | Fraca              | <b>0,47</b>  | <b>&lt;0,01</b> | <b>Moderada</b>    | <b>0,26</b>  | <b>&lt;0,01</b> | <b>Fraca</b>       |
| Argila     | 0,14                   | 0,40            | Bem Fraca          | <b>0,35</b>  | <b>&lt;0,01</b> | <b>Fraca</b>       | <b>0,25</b>  | <b>&lt;0,01</b> | <b>Fraca</b>       |
| S          | 0,17                   | 0,28            | Bem Fraca          | 0,10         | 0,12            | Bem Fraca          | <b>0,19</b>  | <b>0,01</b>     | <b>Bem Fraca</b>   |
| Al         | -0,15                  | 0,35            | Bem Fraca          | <b>-0,19</b> | <b>&lt;0,01</b> | <b>Bem Fraca</b>   | <b>-0,17</b> | <b>0,02</b>     | <b>Bem Fraca</b>   |
| Areia      | -0,19                  | 0,24            | Bem Fraca          | <b>-0,4</b>  | <b>&lt;0,01</b> | <b>Moderada</b>    | <b>-0,26</b> | <b>&lt;0,01</b> | <b>Bem Fraca</b>   |
| Cu         | -0,21                  | 0,18            | Fraca              | -0,04        | 0,53            | Bem Fraca          | -0,05        | 0,52            | Bem Fraca          |
| Densidade  | <b>-0,31</b>           | <b>0,05</b>     | <b>Fraca</b>       | <b>-0,45</b> | <b>&lt;0,01</b> | <b>Moderada</b>    | -0,01        | 0,94            | Bem Fraca          |
| B          | -0,30                  | 0,06            | Fraca              | <b>-0,10</b> | <b>0,1</b>      | <b>Bem Fraca</b>   | -0,13        | 0,08            | Bem Fraca          |
| Mn         | -0,22                  | 0,16            | Fraca              | <b>-0,16</b> | <b>0,01</b>     | <b>Bem Fraca</b>   | -0,07        | 0,38            | Bem Fraca          |
| m%         | <b>-0,39</b>           | <b>0,01</b>     | <b>Fraca</b>       | -0,10        | 0,09            | Bem Fraca          | <b>-0,23</b> | <b>&lt;0,01</b> | <b>Bem Fraca</b>   |

\*Valores em Negrito são significativos do coeficiente de correlação ( $p < 0,05$ ). MO = Matéria Orgânica; CTC = Capacidade de Troca Catiônica; K = Potássio; Ca = Cálcio; P = Fósforo, V% = Saturação de Bases; S = Enxofre; Al = Alumínio; Cu = Cobre; B = Boro; Mn = Manganês; m% = Saturação de alumínio.

De acordo com a literatura, áreas sob manejo florestal, como o eucalipto, podem promover um aumento no estoque de carbono do solo, principalmente pela assimilação de

carbono pelas plantas e pelo incremento de matéria orgânica (Silva et al., 2015). Complementarmente, a qualidade do solo é frequentemente correlacionada ao seu teor de matéria orgânica, sendo solos pobres em MO considerados de baixa qualidade (Vezzani, 2001). Nossos resultados corroboram essa perspectiva, sugerindo que a adoção de manejos que promovam o aumento da quantidade de matéria orgânica no solo pode, conseqüentemente, favorecer o incremento do teor de carbono total.

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) do solo também apresentou correlação positiva e estatisticamente significativa com o C Total em todos os usos do solo avaliados. A correlação foi Moderada nos sistemas de IPF ( $r = 0,58$ ) e Pastagem ( $r = 0,48$ ), e Fraca na Agricultura ( $r = 0,39$ ) (Tabela 07). A matéria orgânica, por sua natureza, influencia a CTC ao fornecer uma maior quantidade de cargas negativas, o que potencializa a retenção e a liberação de nutrientes essenciais para as plantas. Com base nesses resultados, é possível inferir que a CTC e o MO são parâmetros de extrema importância para o acúmulo de carbono no solo, indicando que a manutenção ou o incremento desses atributos são cruciais para a conservação e o aumento dos teores de carbono total.

O teor de fósforo (P) apresentou uma correlação significativa e positiva, embora Fraca ( $r = 0,35$ ), apenas para o uso do solo de IPF ( $p = 0,02$ ) (Tabela 07). Na Agricultura a correlação negativa ( $r = -0,1$ ;  $p = 0,10$ ) pode ser influenciada pela alta demanda de fósforo das plantas cultivadas, que o assimilam rapidamente do solo. A Pastagem não demonstrou correlação estatisticamente significativa ( $p > 0,05$ ).

Já a concentração de potássio (K) demonstrou uma correlação Moderada ( $r = 0,45$ ) e estatisticamente significativa somente para o sistema de IPF ( $p < 0,01$ ) (Tabela 07). Para o uso do solo de Agricultura ( $p = 0,16$ ) e Pastagem ( $p = 0,33$ ), as correlações foram classificadas como Bem Fraca e não se mostraram estatisticamente significativas.

Para a saturação por alumínio (m%) também demonstrou uma correlação negativa significativa para o IPF ( $r = -0,40$ ;  $p < 0,01$ ) e Pastagem ( $r = -0,20$ ;  $p < 0,01$ ), não apresentando correlação com a agricultura (Tabela 07). Esse resultado sugere que, nesses sistemas, o aumento da acidez e da toxicidade por alumínio pode estar associado a menores teores de carbono, um indicativo da influência de fatores químicos na estabilização e no acúmulo de matéria orgânica no solo. Entretanto o alumínio (Al) apresentou correlação negativa com o uso do solo de agricultura ( $r = -0,2$ ;  $p = < 0,01$ ) e pastagem ( $r = -0,2$ ;  $p < 0,02$ ), sendo que o IPF não apresentou correlação significativa com esse parâmetro, para o entendimento melhor desse resultado é

necessário aprofundar as análises para a área de estudo.

No uso do solo de Agricultura, o teor de Silte ( $r = 0,47$ ;  $p < 0,01$ ) e Argila ( $r = 0,35$ ;  $p < 0,01$ ) exibiu correlações positivas e estatisticamente significativas com o C Total, sendo classificadas como Moderada e Fraca, respectivamente. Para o teor de areia esse mesmo sistema apresentou correlação significativa e negativa ( $r = -0,04$ ;  $p = < 0,01$ ). Essa associação sugere que, neste sistema, a maior proporção de frações finas do solo está diretamente relacionada a um maior acúmulo de carbono.

A relação entre a textura do solo e o teor de carbono total mostrou-se dependente do uso do solo. No sistema de Pastagem, a correlação com as frações de Silte ( $r = 0,26$ ;  $p < 0,01$ ) e Argila ( $r = 0,25$ ;  $p < 0,01$ ) foi significativa, embora fraca. Para a fração areia, a correlação foi negativa e significativa.

Em contrapartida, no sistema IPF, a textura do solo não apresentou correlação significativa com o carbono total ( $p > 0,05$ ). Embora estudos como o de Piccoli et al. (2016) demonstrem que solos com texturas mais arenosas tendem a ter uma correlação negativa com o carbono, a ausência de correlação significativa no IPF sugere que, nesse sistema integrado, outros fatores de manejo podem ser mais determinantes na dinâmica do carbono.

Esses resultados indicam que o sistema de IPF é capaz de mascarar a influência típica das frações de textura observada na Pastagem e na Agricultura, possivelmente devido à maior diversidade de plantas e à presença do componente arbóreo. A dinâmica de carbono no IPF parece ser mais influenciada pela integração de seus componentes do que pela textura do solo, o que demanda investigações futuras para identificar quais práticas ou características são mais decisivas na redução da interferência da textura.

A densidade do solo é um parâmetro físico que pode influenciar indiretamente no teor de carbono do solo. Para o sistema de Agricultura, a correlação com o C Total foi negativa e significativa ( $r = -0,50$ ;  $p < 0,01$ ) (Tabela 07), sendo classificada como Moderada. Este resultado é esperado, pois solos com maior teor de matéria orgânica e, conseqüentemente, de carbono, tendem a apresentar menor densidade do solo. No entanto, a Pastagem e IPF, não apresentaram correlação estatisticamente significativa entre a densidade e o C Total, a ausência de correlação nesse caso pode indicar que o carbono total é influenciado significativamente por outros fatores mais impactantes que a densidade do solo, o que merece uma análise mais aprofundada para confirmar sua relevância.

Os teores de boro e manganês apresentaram correlação negativa significativa apenas

para o sistema de uso do solo de agricultura, sendo que para os demais setores não apresentou correlação. Enquanto o cálcio apresentou correlação positiva apenas para o uso do solo de IPF ( $r = 0,44$ ;  $p = <0,01$ ) e pastagem ( $r = 0,34$ ;  $p = <0,01$ ), entretanto a saturação de bases (V%) apresentou correlação significativa positiva apenas para o uso do solo de IPF (Frac) e para o sistema de Agricultura o V% apresentou correlação negativa, porém insignificativa (Tabela 07), Rosset et al. evidencia em seus resultados que a saturação de bases exerce uma correlação significativa com o carbono para os diferentes usos do solo apresentados em seu estudo.

### 5.5 Estoque de Carbono do Solo sob Diferentes Usos do Solo

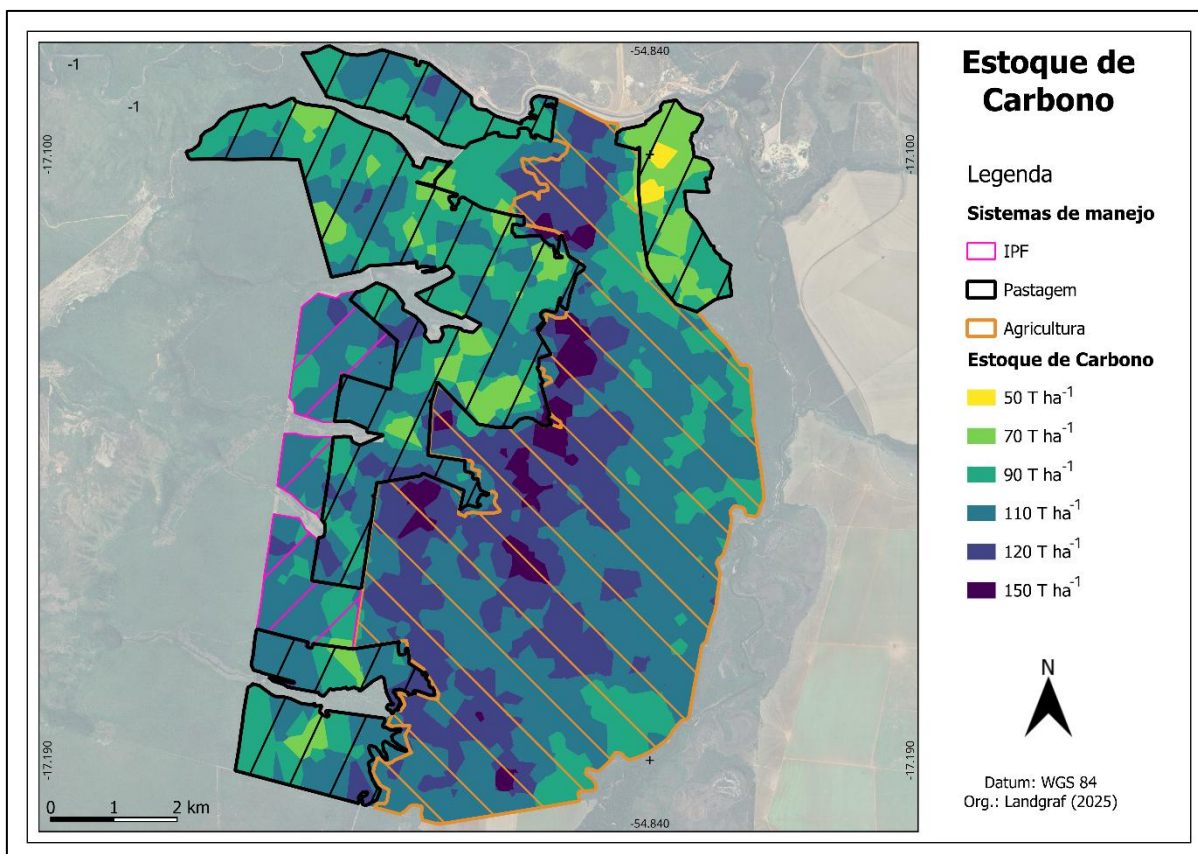
O teste de Kruskal-Wallis a 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ) revelou que ao comparar todos os usos do solo par a par foi encontrado uma diferença significativa entre os estoques de carbono do solo para os diferentes usos do solo avaliado, Agricultura, Pastagem e IPF (Tabela 08), sendo que a maior diferença significativa foi apresentada na comparação entre os sistemas de agricultura e pastagem.

**Tabela 08.** Resultados do Teste de Mann-Whitney para o Estoque de Carbono do solo (EC) em Diferentes Sistemas de Uso do solo.

| <b>Comparação</b>       | <b>Estatística U</b> | <b>Valor p</b>              | <b>Significativo</b> |
|-------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|
| Agricultura vs IPF      | <b>6.897</b>         | <b>0,0012</b>               | VERDADEIRO           |
| Agricultura vs Pastagem | <b>35.628</b>        | <b>2,0185<sup>-28</sup></b> | VERDADEIRO           |
| IPF vs Pastagem         | <b>5.049</b>         | <b>1,7599<sup>-06</sup></b> | VERDADEIRO           |

Valores em negrito são significativos com  $p$  valor  $< 0,05$ .

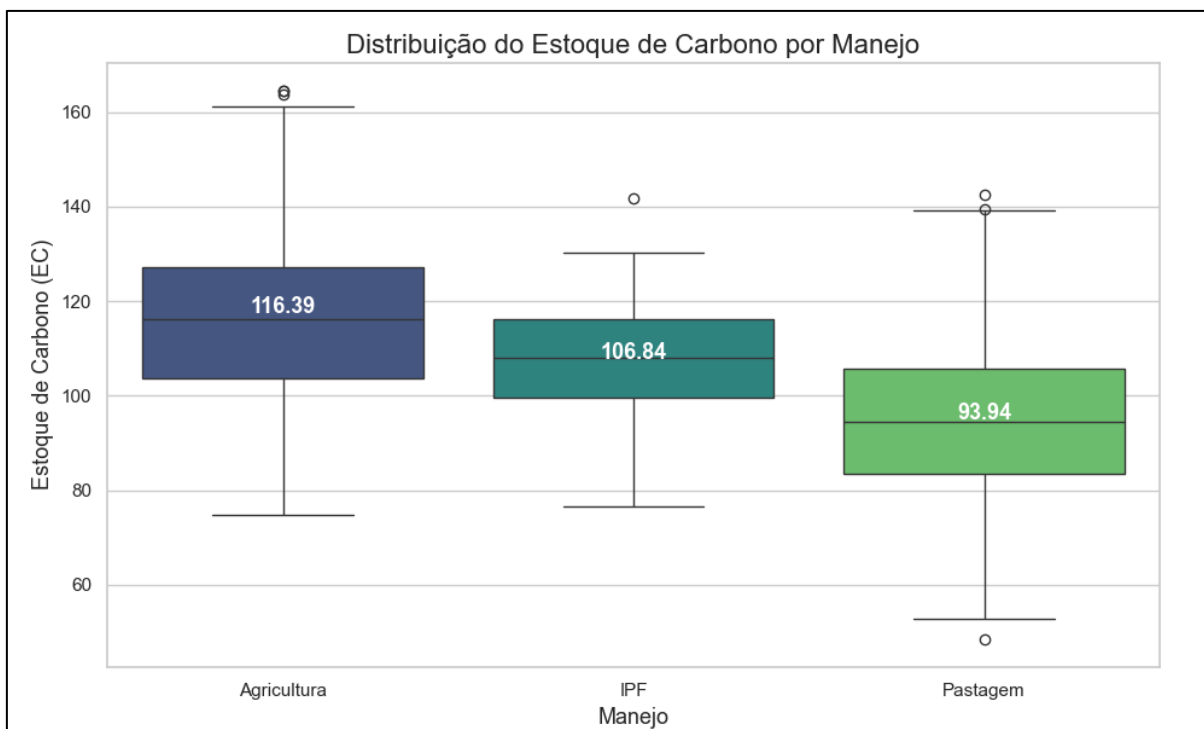
Avaliando a distribuição geográfica do estoque de carbono (EC), nota-se que o sistema de agricultura possui as manchas (azul escuro nos mapas) com os maiores valores de estoque de carbono no solo, outra característica notada é que as manchas com maiores EC no solo acompanham a mesma distribuição geográfica que o teor de argila (Figura 21; Figura 18) para a agricultura.



**Figura 21.** Mapa da variabilidade espacial para o estoque de carbono total do solo ( $t\ ha^{-1}$ ) de 00-60 cm de profundidade por uso do solo. IPF (rosa); Agricultura de grãos (laranja); Pastagem (perto).

As áreas de IPF também apresentam manchas com teores elevados de estoque de carbono no solo, entretanto é possível visualizar uma variabilidade maior na tonalidade das cores. É possível notar na direção Nordeste (NE) do mapa a região que apresentou menor estoque de carbono no solo que está localizada no uso do solo de pastagem, podendo estar relacionado com o manejo aplicado nos últimos anos (Figura 18).

Os estoques médios de carbono no solo variaram entre os sistemas de usos do solo avaliados. O sistema de agricultura registrou o maior estoque médio de carbono, com  $116,39\ T\ ha^{-1}$ , seguido pelo sistema de IPF, com  $106,84\ T\ ha^{-1}$ . Notasse que os valores de estoque de carbono no sistema de IPF possuem dados mais consistentes e menos dispersos em torno da mediana (Figura 22). A agricultura apresentou a maior mediana entre os três usos do solo estudados.



**Figura 22.** Estoque de carbono total (EC) ( $t\ ha^{-1}$ ) no solo por uso do solo na área de estudo para a profundidade de 0-60 cm.

O uso do solo de Pastagem apresentou o menor valor médio, com  $93,94\ t\ ha^{-1}$ . Na Figura 22 visualizamos que a pastagem possui maior dispersão em seus valores de EC, concluindo que a pastagem proporciona uma menor estabilidade para o aporte de carbono no solo podendo estar associado ao fato de que este uso do solo sofre maior interferência com as oscilações no acúmulo e matéria orgânica no solo.

Nota-se sistema de agricultura apresenta o maior potencial de acúmulo de carbono nesta amostra, seguido de perto pelo IPF. A pastagem, em média, demonstra o menor estoque. Desta forma, concluímos que o uso do solo irá influenciar nos acúmulos de carbono no solo e podendo exercer um papel fundamental para a redução dos GEE na atmosfera, auxiliando no combate as condições adversas no clima.

O sistema agrícola apresentou o maior aporte de carbono no solo, um resultado que pode estar associado ao manejo sustentável e inovador adotado na propriedade. Práticas como o plantio direto, rotação de culturas e uso de plantas de cobertura e consórcios são conhecidas por favorecerem o acúmulo de carbono no solo. A classe textural do solo, que também é um fator crucial, pode ter proporcionado uma vantagem a este sistema, facilitando a retenção de carbono em comparação com os demais usos do solo estudados.

O sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (IPF) demonstrou ser um uso do solo intermediário para o aporte de carbono. Embora tenha características texturais e o uso de insumos semelhantes ao sistema de pastagem, seu estoque de carbono foi significativamente maior. O potencial do sistema IPF ganha relevância quando consideramos o contexto da agropecuária brasileira. Com cerca de 164 milhões de hectares de pastagem, sendo grande parte classificada como degradada (MapBiomass, 2025), a adoção do IPF pode ser uma solução estratégica. Esse sistema não apenas contribui para a recuperação de áreas degradadas, mas também para a redução significativa das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor.

## 6. CONCLUSÕES

A Análise de Componentes Principais (PC1 e PC2) revelou que, entre os manejos e usos do solo avaliados agricultura e pastagem, os parâmetros que mais caracterizaram a área de agricultura foram argila, matéria orgânica carbono total, silte e potássio, sendo que para a área de pastagem, as variáveis que mais caracterizaram este uso e manejo do solo e a diferenciaram da área de agricultura foram alumínio, areia, densidade e pH. Para a área de IPF os parâmetros físico-químicos que melhor caracterizaram este uso e manejo do solo foram densidade, pH, areia e Al, sendo que esta área também apresentou valores intermediários para EC e densidade, sugerindo que essa área sendo melhor manejada e com aplicação mais eficiente de fertilizantes e corretivos, pode atingir valores de estoques de C do solo próximos à área de agricultura, mesmo apresentando maiores porcentagens de areia do que a área de agricultura.

Nossos resultados sugerem que para o uso e manejo do solo em agricultura, os parâmetros avaliados matéria orgânica (MO), capacidade de troca catiônica (CTC), potássio (K), saturação de bases (V%) e enxofre (S), apresentaram uma forte correlação positiva com o carbono total e o estoque de carbono, sugerindo que solos com valores maiores desses atributos podem apresentar um potencial maior de acumular carbono no solo. Em contrapartida, para a mesma área de agricultura, os parâmetros areia, alumínio (Al) e saturação de alumínio (m%), demonstraram uma forte correlação negativa com o carbono total no solo, sugerindo que a melhoria e correção desses atributos do solo pode favorecer o acúmulo e maiores estoques de carbono no solo.

Para os três sistemas de produção agropecuária avaliados, a matéria orgânica (MO) apresentou como o principal vetor associado ao acúmulo de carbono no solo, apresentando correlações muito fortes e positivas com o C total, sendo que a CTC apresentou correlação

moderada para IPF e Pastagem e correlação fraca para agricultura. Para os usos do solo de pastagem e agricultura, os parâmetros Al, areia e saturação por Al (m%) mostraram correlações negativas com o C total do solo, podendo explicar menores concentrações de C nos usos e manejos de pastagem e IPF.

O estoque de carbono total no solo (0-60 cm) apresentou diferenças significativas entre todos os sistemas de uso e manejo das áreas avaliadas, sendo que o uso de Agricultura apresentou o maior valor médio de C do solo, seguido pelo IPF e Pastagem.

O mapa de variabilidade espacial para o estoque de C do solo mostrou grande variabilidade espacial na área de agricultura com valores entre 90 a 150 t C ha<sup>-1</sup>, IPF de 90 a 120 e a área de pastagem variando de 50 a 120 t C ha<sup>-1</sup>, demonstrando heterogeneidade entre os diferentes usos e manejo do solo, que podem ser melhorados pelo uso e aplicação de tecnologias de agricultura de precisão, delineando zonas de manejo específico para calagem e adubações, contribuindo para melhor eficiência produtiva das áreas, menor gasto com insumos e maior potencial de sequestro de C no solo, contribuindo para a uma agricultura e pecuária mais sustentável e resiliente aos efeitos das mudanças climáticas globais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADUAM, R. E.; VILELA, M. F.; KLINK, C. A. Ciclagem de Carbono em Ecossistemas Terrestres – O caso do Cerrado Brasileiro. **Embrapa Cerrados. Documentos**, Planaltina, DF, n. 105, p. 30, 2003.
- ALPINO, T. de M. A. *et al.* Os impactos das mudanças climáticas na Segurança Alimentar e Nutricional: uma revisão da literatura. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 27, n. 01, p. 273-286, 2022.
- ALVARES, C.A. *et al.* 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- AMARAL, A. M. do; MUNIZ, J. A.; SOUZA, M. de. Avaliação do coeficiente de variação como medida da precisão na experimentação com citros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 12, p. 1221–1225, 1997.
- ANESE, A C. S. A compensação dos créditos de carbono no setor aeronáutico e a perspectiva de tributação no Brasil. **Revista de Derecho, Cultura y Proceso: de la complejidad social a la experiencia jurídica**, v. 1, n. 1, 2024.
- ANIS, C. F.; CARDUCCI, C. E.; RUVIARO, C. F. Mercado de carbono agrícola: realidade ou desafio?. **Multitemas**, p. 163-188, 2022.
- ARANTES, S. M. **Análise socioeconômica e de uso da terra da produção de etanol de milho segunda safra, no Centro-Oeste Brasileiro**. 2023. Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2023.
- ASSAD, E. D. Sistemas agrícolas adaptados às mudanças climáticas. **Ciência e cultura**, v. 73, n. 1, p. 35-40, 2021.
- ASSIS, P. C. R. *et al.* Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 4, p. 309-316, abr. 2015.
- CARVALHO, J. L. N. *et al.* Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 277-290, 2010.
- CARVALHO, T. A. **Estoque de carbono em solo de pastagem: fatores para mudança de uso da terra e melhoria no manejo**. 2023. 54 f. Dissertação (Gestão de Recursos Agroambientais) – Instituto Agrônomo, Campinas, 2023.
- CINTRA, P. H. N.; MELO, O. F. P.; MENEZES, J. O. DA S. PRODUÇÃO AGRÍCOLA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E PRODUTIVIDADE DE PLANTAS GRANÍFERAS NO BRASIL. **Revista Agrotecnologia-Agrotec**, v. 11, n. 1, p. 87-94, 2020.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Boletim da Safra de Grãos – 8º levantamento, safra 2024/25. Brasília, DF: Conab, 2024. Disponível em:

<https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/8o-levantamento-safra-2024-25/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 20 maio 2025.

**COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB)**. Série histórica das safras. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/conab/pt-br>>. Acesso em: 03 mai. 2025.

COSTA, J.; PEREIRA, G.; SIQUEIRA, M.E.; CARDOZO, F.; SILVA, V.V. 2019. Validação dos dados de precipitação estimados pelo CHIRPS para o Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, 24:228-243.

CRESPO, A. M.; SOUZA, M. N.; DA SILVA, M. A. B. Ciclo do carbono e sistemas agroflorestais na sustentabilidade da produção agrícola: revisão de literatura **Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural**, v. 13, n. 14, p. 06–19, 2023.

DONAGEMMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. (Embrapa Solos. Documentos, 132). Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/990374/1/ManualdeMtodosdeAnilisedeSolo.pdf#page=29.00>>.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995.

**EMBRAPA**. Ciência e tecnologia tornaram o Brasil um dos maiores produtores mundiais de alimentos. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, [2024]. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/75085849/ciencia-e-tecnologia-tornaram-o-brasil-um-dos-maiores-produtores-mundiais-de-alimentos>>. Acesso em: 20 maio 2025.

**EMBRAPA**. Mapas trazem novas informações sobre estoque de carbono nos solos brasileiros. 2024. Disponível: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/66040634/mapas-trazem-novas-informacoes-sobre-estoque-de-carbono-nos-solos-brasileiros>>. Acesso em: 03 de mai. 2025.

FAHRLAND, E. Copernicus DEM Product Handbook (v3. 0). **Airbus Def. Space GmbH Taufkirch**. Ger, 2020.

FAUSTINO, A.; MANTOVANELI JUNIOR, O.; BARBOSA, V. C. Concepção de Desenvolvimento Sustentável para a Governança Internacional: Análise dos Eventos Históricos até a Agenda 2030. **Historia Ambiental Latinoamericana y Caribeña (HALAC) revista de la Solcha**, v. 14, n. 3, p. 385–419, 2024.

FERREIRA, D. F. **Estatística multivariada**. Lavras: Editora Ufla, 2008.

FERREIRA, M M. C. **Quimiometria: conceitos, métodos e aplicações**. Editora da UNICAMP, 2015.

FIDALGO, E. C. C. *et al.* **Estoque de carbono nos solos do Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007.

FONTANELI, R. S. *et al.* **Integração lavoura-pecuária-floresta: intensificação sustentável para a sobrevivência humana**. 2019.

FREDERICO, A. dos S., **Análise do comportamento de CO<sub>2</sub> na agricultura nos estados Nordestinos**. Monografia - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

FUNK, C *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations - a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data** **2:150066**. 2015.

GARÇON, M. V. B. **Agricultura digital no manejo nutricional da cultura do café**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2024.

GODOY, S. G. M. de. **Kyoto Protocol and clean development mechanism: potencialities and limits evaluation**. Tese de Doutorado - Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2005.

GOVERS, G. *et al.* Soil conservation in the 21st century: why we need smart agricultural intensification. **Soil**, v. 3, n. 1, p. 45-59, 2017.

GUEDES, S. D. *et al.* Evaluation of univariate and multivariate calibration strategies for the direct determination of total carbon in soils by laser-induced breakdown spectroscopy: tutorial. **Journal of the Optical Society of America B**, v. 40, n. 4, p. 1013-1021, 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Banco de Dados e Informações Ambientais: um instrumento para organização e preservação**. Disponível em: <<https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>>. Acesso em: 6 dez. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Estatística da produção pecuária: primeiros resultados. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/21119-primeiros-resultados-2abate.html?edicao=43355>>. Acesso em: 2 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Panorama do município de Itiquira (MT)**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt/itiquira/panorama>>. Acesso em: 25 de maio de 2025.

IPCC. Mudança do Clima 2021: a base científica. Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

IPCC. Mudança do Clima 2023: relatório síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III ao Sexto Relatório de Avaliação do IPCC. Genebra: Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, 2023.

**IPCC.** Mudança do Clima e Terra: relatório especial do IPCC sobre mudança do clima, desertificação, degradação da terra, manejo sustentável da terra, segurança alimentar e fluxos de gases de efeito estufa em ecossistemas terrestres. Genebra: Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, 2019.

**IPEA.** **Avaliação de impacto do Programa de Agricultura de Baixo Carbono no Brasil.** Rio de Janeiro: IPEA, 2021.

**IPEA.** **Desenvolvimento da agricultura de baixo carbono no Brasil.** Rio de Janeiro: IPEA, 1990.

JONES, E.; OLIPHANT, T.; PETERSON, P. **SciPy: Open source scientific tools for Python.** 2001. Disponível em: <<http://www.scipy.org/>>. Acesso em: 03 de junho de 2025.

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

LEMOS, R. C. d; Santos, R. D. d. **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** 3.<sup>a</sup> ed. Campinas, Sociedade Brasileira do solo 1996.

MARTINS, A. G. et al. **Manejo do solo em sistemas integrados de produção.** Ponta Grossa: Atena, 2022.

MCKINNEY, W. Data structures for statistical computing in Python. **scipy**, v. 445, n. 1, p. 51-56, 2010.

MILNE, E. et al. Methods for the quantification of GHG emissions at the landscape level for developing countries in smallholder contexts. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 1, p. 015019, 2013.

MIZIOLEK, A. W.; PALLESCHI, V.; SCHECHTER, I. **Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS): Fundamental and Applications.** 1a ed. New York: Cambridge University Press, 2006. 640 p.

MOREIRA JUNIOR, D. P.; BUENO, C.; SILVA, C. M. A utilização de mídias como recurso didático para a abordagem e contextualização das mudanças climáticas na Educação Ambiental. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, v. 17, n. 2, p. 169-183, 2022.

MOREIRA, H. M.; GIOMETTI, A. L. B. dos R.. Protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de projetos em energia limpa. **Contexto internacional**, v. 30, p. 9-47, 2008.

**NAÇÕES UNIDAS BRASIL.** Brasil lança plano para promoção da agricultura de baixo carbono até 2030. 2021. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/125850-brasil-lan%C3%A7a-plano-para-promo%C3%A7%C3%A3o-da-agricultura-de-baixo-carbono-at%C3%A9-2030>>. Acesso em: 20 abr. 2025.

NOBRE, C. et al. As Metrôpoles brasileiras no contexto das mudanças climáticas: entrevista com Carlos Nobre. **Em: 50 Anos de regiões metropolitanas no Brasil e a Política Nacional**

**de Desenvolvimento Urbano: no cenário de adaptação das cidades às mudanças climáticas e à transição digital.** [s.l.] Ipea, 2024. p. 237–247.

OLIPHANT, T. E. **Guide to Numpy: 2Nd Edition.** North Charleston, SC, USA: Createspace Independent Publishing Platform, 2006.

OLIVEIRA, P.P.A. **Protocolo para quantificação dos estoques de carbono do solo da rede de pesquisa Pecu.** São Carlos: Embrapa Pecuária-Sudeste, 2014.

ORNELAS, N. M. Q. *et al.* TÉCNICAS DE RECARBONIZAÇÃO DO SOLO NA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, v. 13, n. 2, p. e952-e952, 2024.

PEIXER, J. F. B. **A contribuição nacionalmente determinada do Brasil para cumprimento do Acordo de Paris: metas e perspectivas futuras.** 346 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

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

PICCOLI, I. *et al.* Disentangling the effects of conservation agriculture practices on the vertical distribution of soil organic carbon. Evidence of poor carbon sequestration in North-Eastern Italy. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 230, p. 68- 78, 2016. 10.1016/j.agee.2016.05.035

PLANO, A. B. C. Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, 2012.

**Projeto MapBiomass** –Pastagem, Soja e Cana ocupam 77% da área de agropecuária no Brasil. Coleção 9. Disponível em: < <https://brasil.mapbiomas.org/2024/12/06/pastagem-soja-e-cana-ocupam-77-da-area-de-agropecuaria-no-brasil/>>. Acessado em: 30 de jul de 2025.

RAMALHO-FILHO, A.; BEEK, K. J. Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras. 3. ed. Rio de Janeiro: **EMBRAPA-CNPS**, 1995, 65 p.

RAZUK, R. B. **Avaliação do sistema radicular de acessos de Brachiaria brizantha e suas relações com atributos químicos e físicos do solo.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. 2002.

REHBEIN, A.; AMBRIZZI, T. Mudanças climáticas atuais. **Cadernos de Astronomia**, v. 6, n. 1, p. 6-10, 2025.

RIBEIRO, W. C. Geografia política e gestão internacional dos recursos naturais. **Estudos avançados**, v. 24, p. 69-80, 2010.

RONQUIM, C. C. *et al.* **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais.** 2. Ed. Campinas, Embrapa Territorial, 2020.

SALTON, J. C. *et al.* Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 46, p. 1349-1356, 2011.

SANTOS, H. G. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ed. Brasília: Embrapa, 2018.

SANTOS, L.; DAVID, J. M. N.; BRAGA, R. Uma abordagem para suporte à decisão no processo de geração de créditos de carbono em propriedades rurais. In: **Simpósio Brasileiro de Sistemas Colaborativos (SBSC)**. SBC, p. 1-15, 2023.

**SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões de Gases e Efeito Estufa**. Emissões de GEE no Brasil e suas implicações para o clima e a economia: Observatório do Clima, 2024. Disponível em: <<https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2025.

**SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões de Gases e Efeito Estufa - MUNICÍPIOS**. Soluções para redução das emissões de gases de efeito estufa nos municípios brasileiros. 2021. Disponível em: <<https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2023/12/SEEG-SOLUCOES.pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2025.

SHIMAKURA, S. E. **Interpretação do coeficiente de correlação**, In **CE003 - Estatística II**. Universidade Federal do Paraná. 2006.

SIEGEL, Sidney; CASTELLAN JR., N. John. **Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

SILVA, G. N.; BONETTI, J. de A.; SOUZA, E. D.; PAULINO, H. B.; CARNEIRO, M, A. C.; Sistemas de manejo e uso do solo sobre frações e estoques de carbono orgânico e nitrogênio total em Latossolo Cerrado. **Revista Biociências**, v. 6, pág. 1482-1492, 2016.

SILVA, G. S. da. **Estoques de Carbono do Solo em Sistemas Produtivos com Certificação Orgânica e Convencional**. 2024. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2024

SISTI, C. P. J. *et al.* Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.

SOTTA, E. D. *et al.* **Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária 2020-2030: Plano Operacional**. Brasília. 2021.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

SOUZA, B. S. Mudanças climáticas no Brasil: efeitos sistêmicos sob cenários de incerteza. **POLICY**, n. 1, 2020.

SOUZA, K. W. *et al.* **Integração lavoura-pecuária floresta como estratégia para compensação das emissões de gases de efeito estufa**. 1ed. Planaltina: Embrapa, 2019.

SOUZA, S. L. V. B. **Os créditos de carbono no âmbito do Protocolo de Quioto**. 2007. 132 f. Dissertação (Mestrado em Direito Público) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2007.

TROIAN, D. et al. Carbono orgânico e estoque de carbono do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista em Agronegócio e meio ambiente**, v. 13, n. 4, p. 1447-1469, 2020.

**UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Relatório de Síntese das NDCs 2023. Bonn: Secretariado da UNFCCC, 2023. (Título traduzido para o português.) Disponível em: <https://unfccc.int>. Acesso em: 17 ago. 2025.

**UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA)**. Soil Survey Manual. Washington, DC: Natural Resources Conservation Service, 2017. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/The-Soil-Survey-Manual.pdf>. Acesso em: 7 jun. 2025.

VAN ROSSUM, G.; DRAKE, F. L., Jr. **Introduction to Python 2.6: (Python Documentation Manual Part 1)**. [s.l.] Createspace, 2009.

VEZZANI, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul 0 UFRS.

VINHOLIS, M. M. B., CARRER, M. J., SOUZA FILHO, H. M., & BERNARDO, R. (2022). Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Estado de São Paulo: estudo multicasos com adotantes pioneiros. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 60 n. 1, p. e234057, 2021.

VIOLA, E.; MENDES, V. Agricultura 4.0 e mudanças climáticas no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. 25, p. e02462, 2022.

ZANATTA, Josiléia Acordi; PULROLNIK, Karina; VIANA, João Herbert Moreira. Protocolo para avaliação do estoque de carbono e de nitrogênio do solo em sistemas florestais–Projeto Saltus. **Embrapa Florestas**, 2015.